

Universidade da Beira Interior



Estudo Numérico de uma Asa CDG para Fórmula 1

Dissertação de Mestrado

João P. S. Correia

Maio, 2008

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao meu orientador, o Professor Dr. Jorge Barata, pelo apoio e interesse que mostrou neste trabalho. Ao Sr. Tushar Sambharam, da Ansys, pelo apoio que deu na resolução de alguns problemas que surgiram no decorrer do trabalho. A todos os Professores, colegas e funcionários do Departamento de Ciências Aeroespaciais que mostraram interesse no meu trabalho. Por fim, agradeço aos meus pais e à Raquel por todo apoio e paciência que tiveram ao longo desta longa caminhada.

Índice

AGRADECIMENTOS	1
ÍNDICE.....	2
ÍNDICE DE IMAGENS	3
ÍNDICE DE GRÁFICOS	3
RESUMO.....	4
INTRODUÇÃO.....	5
1.1 A HISTÓRIA DA FÓRMULA 1	5
1.2 EVOLUÇÃO DA AERODINÂMICA NA FÓRMULA 1	7
1.3 A IMPORTÂNCIA DA AERODINÂMICA NA COMPETIÇÃO AUTOMÓVEL	14
1.4 “DOWNFORCE”	15
1.5 RESISTÊNCIA AERODINÂMICA	19
1.6 CAD	20
1.7 DASSAULT SYSTEMS – CATIA	22
1.8 AERODINÂMICA NA FÓRMULA 1	22
1.8.1 Nariz e asa dianteira	22
1.8.1.1 Nariz	23
1.8.1.2 Asa dianteira	24
1.8.2 Asa traseira	29
1.8.3 Fundo do carro.....	30
1.8.4 Caixa-de-ar e capot-motor.....	31
1.8.5 Rodas.....	32
1.8.6 Apêndices aerodinâmicos.....	32
1.8.6.1 “Horns”.....	33
1.8.6.2 “Winglets”	33
1.8.6.3 “Barge Boards”	34
1.8.6.4 Outros	34
1.9 CDG-WING (CENTRAL DOWNWASH GENERATING WING)	35
RESULTADOS	38
2.1 INTRODUÇÃO	38
2.2 DESIGN DOS COMPONENTES	39
2.3 ENSAIOS EM CFD.....	42
2.3.1 Validação da metodologia computacional.....	42
2.3.2 Seleção das velocidades de ensaio	44
2.3.3 Volume de controlo, malha e condições de fronteira	46
2.3.4 Critério de Convergência.....	49
ENSAIOS E RESULTADOS	52
3.1 1ª FASE.....	52
3.2 2ª FASE.....	53
3.3 ANÁLISE DE RESULTADOS.	54
CONCLUSÕES.....	59
REFERÊNCIAS.....	60
FONTES DAS IMAGENS	61

Índice de imagens

FIGURA 1 - LOGÓTIPO DA FÓRMULA 1	5
FIGURA 2 - ALFA ROMEO 158	8
FIGURA 3 - COOPER T45	8
FIGURA 4 - LOTUS 38	8
FIGURA 5 - LOTUS 49T	9
FIGURA 6 - LOTUS 79	10
FIGURA 7 – DIAGRAMA DO FUNDO DO LOTUS 79	10
FIGURA 8 - BRABHAM BT46	10
FIGURA 9 - TYRRELL 019	11
FIGURA 10 - FUNDO DO CARRO E PLACA DE MADEIRA	11
FIGURA 11 - “BARGE BOARD”	12
FIGURA 12 - “WINGLET”	12
FIGURA 13 - “ENDPLATE”	13
FIGURA 14 - CARRO DE 2006 COM ALTERAÇÕES REGULAMENTARES	13
FIGURA 15 - CONCEITO CDG PARA 2008	14
FIGURA 16 - DIAGRAMA DO “DOWNFORCE”	15
FIGURA 17 – TRAJECTÓRIA DA CURVA	17
FIGURA 18 - GRÁFICO DE DESEMPENHO DO PNEU	19
FIGURA 19 – DR. SUTHERLAND A TRABALHAR NO SKETCHPAD	21
FIGURA 20 - NOMENCLATURA DA ASA	25
FIGURA 21 - EFEITO DE COANDA	26
FIGURA 22 – “HORNS”	33
FIGURA 23 - “WINGLETS”	34
FIGURA 24 - “BARGEBOARDS”	34
FIGURA 25 - DIFERENTES COMPONENTES AERODINÂMICOS TESTADOS NA FÓRMULA 1	35
FIGURA 26 - CARRO DO CONCEITO CDG	36
FIGURA 27 - DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO TOTAL NUM CARRO CONVENCIONAL E NUM CARRO CDG	37
FIGURA 28 - RESULTADO DO ESTUDO DE ALI E MCBEATH	37
FIGURA 29 - PLANO DE REFERÊNCIA	40
FIGURA 30 - GEOMETRIA REGULAMENTAR	40
FIGURA 31 - 3 MODELOS DE ASA E OS ÂNGULOS DE ATAQUE DO CONJUNTO	41
FIGURA 32 - ESCOAMENTO EM TORNO DO CILINDRO	44
FIGURA 33 - VISTA AÉREA DAS CURVAS SELECIONADAS	45
FIGURA 34 - VISTA DO SIMULADOR “F1 CHALLENGE 99-02”	46
FIGURA 35 - DIMENSÕES DO VOLUME DE CONTROLO	47
FIGURA 36 – SUBDOMÍNIO DA MALHA UTILIZADO PARA A ROTAÇÃO	48
FIGURA 37 - CONJUNTO ASA/RODA DENTRO DO VOLUME DE CONTROLO	49
FIGURA 40 - ASA SEM CONJUNTO RODA/JANTE NO VOLUME DE CONTROLO	52
FIGURA 41 - ASA E CONJUNTO RODA/JANTE DENTRO DO VOLUME DE CONTROLO	53
FIGURA 42 – VELOCIDADE DO ESCOAMENTO NA PERIFERIA DA ASA Mk2, A DIFERENTES VELOCIDADES	55
FIGURA 43 - COMPARAÇÃO DO ESCOAMENTO NA ASA Mk2 SEM RODA E COM RODA, A 295 KM/H	56
FIGURA 44 – VELOCIDADE DO ESCOAMENTO AO LONGO DO VOLUME DE CONTROLO	57
FIGURA 45 – VELOCIDADE DE ESCOAMENTO NA PERIFERIA DA ASA, A 125 KM/H	57

Índice de gráficos

GRÁFICO 1 - COEFICIENTE DE RESISTÊNCIA DE UM CILINDRO BIDIMENSIONAL EM FUNÇÃO DE REYNOLDS	43
GRÁFICO 2 - RESÍDUOS PARA UMA SIMULAÇÃO DA PRIMEIRA FASE	50
GRÁFICO 3 - REGIME OSCILATÓRIO VERIFICADO NO INÍCIO DA SEGUNDA FASE	51
GRÁFICO 4 - VARIAÇÃO DO “DOWNFORCE” COM A VELOCIDADE	54

Resumo

A Fórmula 1 é um desporto motorizado onde a aerodinâmica desempenha um importante papel, obrigando a que as equipas gastem milhões de dólares anualmente de modo a garantirem uma vantagem em relação aos seus adversários, sendo a aerodinâmica uma das áreas chave para garantir o sucesso. Com este trabalho pretende-se analisar e otimizar, em determinadas condições, uma nova asa imposta pela Federação Internacional do Automóvel, que deverá ser introduzida na temporada de 2009.

Os testes foram efectuados computacionalmente, simulando condições próximas das que se verificam em três dos Grandes Prémios do Campeonato Mundial de Fórmula 1. Em particular foram analisadas diversas posições da asa CDG, assim como diversas configurações possíveis e condições de funcionamento.

Verificou-se que o posicionamento da asa CDG próximo da roda traseira traduz-se num aumento da força aerodinâmica descendente criada pela asa, assim como numa diminuição significativa da esteira produzida, diminuindo o seu efeito no desempenho aerodinâmico de um veículo seguidor.

Introdução

1.1 A História da Fórmula 1

Em 1950, a pedido do Sr. António Brivio-Sforza foi criado o Campeonato do Mundo de Pilotos de Fórmula 1. Embora já existissem competições automóveis que utilizavam os carros que viriam a ser utilizados nas primeiras épocas da Fórmula 1, apenas nesta altura a Fórmula 1 passou a ser reconhecida. Nesta fase inicial da competição não existia qualquer disputa de construtores de automóveis o que afastou alguns construtores que optavam por permanecer em competições com maior divulgação, como o caso das 24 Horas de Le Mans. Assim em 1958 a Federação Internacional do Automóvel (FIA) criou o campeonato de construtores, que veio aumentar o interesse da Fórmula 1 para os construtores automóveis, pois possibilitava a competição directa entre fabricantes de modo a mostrar as qualidades dos seus carros ao público.



Figura 1 - Logótipo da Fórmula 1

Esta nova abertura aos construtores e a necessidade de se obter bons resultados face aos construtores adversários levou a um grande desenvolvimento tecnológico dos carros utilizados e, em particular, dos seus mais diversos componentes, contudo durante muitos anos este desenvolvimento limitou-se a desenvolvimentos mecânicos e no caso da aerodinâmica na tentativa de diminuir globalmente a resistência aerodinâmica dos carros. Esta aparente falta de interesse na exploração da aerodinâmica devia-se em parte à falta de conhecimento da dinâmica dos veículos assim como o ainda elementar conhecimento de conceitos aerodinâmicos.

Apenas em 1968 começaram a aparecer algumas soluções aerodinâmicas que melhoravam o comportamento e desempenho dos carros. O aparecimento destes componentes aerodinâmicos deveu-se à crise que a indústria aeronáutica inglesa passava após o fim da segunda guerra mundial, assim vários engenheiros aeronáuticos no desemprego seguiram para o ramo automóvel e aplicaram os seus conhecimentos não de modo a se levantar voo, mas de modo a empurrar os carros contra a pista, aumentando a aderência e permitindo, assim, melhorias nos tempos por volta.

Actualmente, a aerodinâmica é um dos elementos chave dos carros de Fórmula 1. Embora muitos considerem que a resistência aerodinâmica é a força aerodinâmica que mais influencia o desempenho de um carro, tal não é totalmente verdade pois quanto maior a força de aderência¹ maior será a sua capacidade de curvar mais rapidamente. A força que empurra o carro contra o asfalto consiste numa sustentação criada por asas invertidas e outros elementos aerodinâmicos, contudo esta sustentação, embora na mesma direcção, aponta em sentido oposto à sustentação de uma aeronave, logo a sustentação num carro consiste numa força aplicada de cima para baixo. Esta força é vulgarmente conhecida pelo seu nome inglês de “downforce” ou sustentação negativa em português.

Um dos elementos que limita a capacidade de um carro curvar é o coeficiente de atrito dos pneus, pois estes são as superfícies que estabelecem o contacto entre a pista e o carro. Como todos sabemos a força de atrito é proporcional à força normal aplicada ao material multiplicado pelo coeficiente de atrito. Embora esta condição seja válida, temos que ter em consideração que em determinadas condições o coeficiente de atrito varia. No caso dos pneus o seu coeficiente de atrito varia com a temperatura do pneu, com a carga vertical aplicada sobre ele e por fim a área de contacto que o pneu tem com o chão, que varia consoante a extensão ou compressão da suspensão devido à geometria da mesma.

Todas as equipas ao projectarem os seus carros têm em consideração alguns dados fornecidos pelos fabricantes dos pneus dos seus carros, que fazem também desenvolvimento em conjunto. Dados estes que incluem a tracção máxima que o pneu tem em função da carga aplicada sobre este. Através destes dados torna-se possível calcular o coeficiente de atrito do pneu, que varia com o aumento da carga vertical.

Uma das formas mais simples de aumentar a carga vertical sobre os pneus consiste no aumento da massa do carro, contudo este método traz algumas desvantagens a nível da dinâmica do veículo e no desempenho quando em aceleração, isto devido à inércia. A outra forma consiste em aumentar o peso aparente do carro induzindo uma força vertical sobre ele, neste caso esse aumento é conseguido através do aumento da força aerodinâmica vertical, o “downforce”, sem que este aumento traga alguma desvantagem a nível de desempenho dinâmico do carro.

Ao longo dos anos as equipas têm desenvolvido diversas soluções de modo a aumentar a carga aerodinâmica sem que houvesse um incremento na resistência aerodinâmica, aumentando assim a eficiência aerodinâmica, contudo, frequentemente, as equipas têm gasto milhões de dólares em desenvolvimentos e acabam por vê-los proibidos pela Federação Internacional

¹ Força como que se “empurra” o carro contra o asfalto.

do Automóvel (FIA), a entidade regulamentadora da competição, que invocam razões de segurança ou de competitividade.

Devido ao ritmo de desenvolvimento de um carro de fórmula 1 e a questões de competição entre as equipas, não existe muito tempo e vontade para a publicação de artigos científicos que expliquem e demonstrem as melhorias que as equipas fazem no carro ao longo da temporada. O desenvolvimento de um carro de Fórmula 1 consiste em experimentação de componentes e análise dos resultados obtidos, nem sempre são estudados os fundamentos teóricos do funcionamento dos componentes, devido ao ritmo de desenvolvimento. Ao longo de uma temporada são testados inúmeros componentes no túnel de vento ou em programas computacionais, que apenas após validação num dos processos anteriores poderão ser montados no carro, contudo isto não garante o sucesso da peça, pois muitas peças que chegam à pista são abandonadas após pouco tempo.

1.2 Evolução da aerodinâmica na Fórmula 1

Em 1950 quando a Fórmula 1 começou a disputar-se como uma competição organizada e com regulamentos bem definidos, os construtores pouco interesse mostraram nesta competição, devido à inexistência de um campeonato de construtores, pois nesta fase inicial apenas se tratava de um campeonato de pilotos. Devido a esta situação os construtores preferiam participar em provas que trouxessem maior reconhecimento para os construtores de automóveis tal como a prova das 24 Horas de Le Mans. Sendo os carros utilizados nesta fase inicial versões de estrada, de venda ao público, alteradas pelos mecânicos dos pilotos de modo a competirem.

Apenas em 1958 foi criado o Campeonato Mundial de Construtores, tornando assim a Fórmula 1 mais apelativa para os construtores de automóveis, que aproveitaram esta hipótese para mostrar ao público as novidades tecnológicas que cada construtor estava a implementar nos seus automóveis.

Nesta fase inicial da Fórmula 1 poucos construtores pensavam nos benefícios que a aerodinâmica poderia trazer para os seus carros, pensando que apenas a potência do motor seria a única variável que o construtor poderia mexer de modo a influenciar os tempos por volta.

Devido a esta falta de conhecimento relativo à aerodinâmica e relativo ao comportamento dos pneus, apenas a resistência aerodinâmica era considerado embora apenas pelas equipas inglesas e alemãs que possuíam motores menos potentes que as equipas italianas, que na altura consideravam a propulsão como o ponto-chave para o sucesso.



Figura 2 - Alfa Romeo 158

Como poderemos observar o Alfa Romeo 158, um dos modelos da Alfa Romeo utilizado em 1950 e nas primeiras temporadas da Fórmula 1, possui uma forma muito pouco cuidada com uma grande secção frontal.

Apenas no final da década dos anos 50 é que as equipas começaram a preocupar-se com a diminuição da resistência aerodinâmica, como é possível verificar no caso do Cooper T45, que já começa a apresentar uma forma um pouco mais esbelta.



Figura 3 - Cooper T45

Contudo, apenas em meados dos anos 60 é que as equipas começaram a tomar uma maior atenção com o desenho dos seus carros. Este interesse apareceu devido à crise que a indústria aeronáutica inglesa passava nessa altura, que levou ao desemprego muitos engenheiros aeronáuticos que procuraram aplicar os seus conhecimentos de aerodinâmica nos carros, na tentativa que estes obtivessem melhores desempenhos. No caso do Lotus 38 já começa a ser bastante evidente a tentativa de tornar os carros cada vez mais esbeltos de modo a diminuir a sua resistência aerodinâmica.



Figura 4 - Lotus 38

Em 1968 começam a aparecer as asas nos carros de fórmula 1. Começam por ser apenas perfis montados em suportes bastante arcaicos que frequentemente cediam causando acidentes bastante graves. A Lotus foi a pioneira na colocação de asas nos seus carros, colocando uma asa traseira nos suportes e dois perfis dianteiros, asas que eram bastante ineficientes. Como poderemos verificar na figura o carro que segue em 2º lugar também possui asa dianteira e traseira, contudo neste caso a asa dianteira também estava montada em suportes.



Figura 5 - Lotus 49T

Ainda no ano de 1968 a Ferrari utilizou no Grande Prémio de Itália uma asa traseira com um mecanismo que permitia variar o ângulo de ataque da asa mesmo com o carro em andamento. No final deste ano a Federação Internacional do Automóvel proibiu elementos aerodinâmicos móveis.

Até 1972 as asas foram sofrendo desenvolvimentos e passaram a ser utilizados “endplates” na tentativa de melhorar a eficiência aerodinâmica das asas e consequentemente do carro. Neste ano surgiram os primeiros carros com caixas-de-ar, na tentativa de aumentar a potência do motor. Para além do aparecimento das caixas-de-ar foi também nesta altura que se começou a estudar a influência da altura ao solo no desempenho global do carro.



Figura 15 - Tyrrell 005

Ao longo dos próximos 7 anos o desenvolvimento aerodinâmico girou muito à volta da optimização das asas e da caixa-de-ar, até que em 1978 a equipa Lotus com o seu modelo 79 revolucionou o mundo da Fórmula 1. Esta revolução consistiu na aplicação de um perfil alar invertido no fundo do carro, permitindo explorar ao máximo o efeito de solo. De modo a aumentar a eficiência do fundo do carro a equipa aplicou umas saias que selavam o fundo do carro impedindo que entrasse ar pelos lados aumentando assim a pressão verificada no fundo do carro.



Figura 6 - Lotus 79

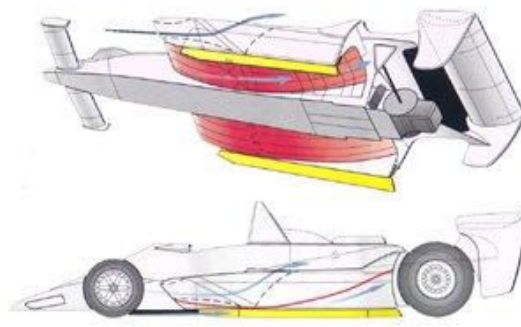


Figura 7 – Diagrama do fundo do Lotus 79

Durante esta era do efeito de solo na Fórmula 1 apareceram diversas soluções originais que tinham como função otimizar ainda mais o fundo do carro e explorar ao máximo o efeito de solo. De destacar o Brabham BT46, de 1978 que surgiu no final da temporada, este carro que possuía uma ventoinha na traseira do carro que estava acoplada à caixa de velocidade. Embora esta ventoinha alegadamente fosse apenas para auxiliar a refrigeração do motor que não possuía radiadores, assim a refrigeração era feita através de alhetas no motor. Contudo após a prova de estreia deste carro foi considerado ilegal e os regulamentos foram alterados de modo a proibir equipamentos do género que auxiliavam o efeito de solo.



Figura 8 - Brabham BT46

Durante dos próximos 4 anos muito trabalho foi feito numa tentativa de ainda otimizar mais o desenho do fundo dos carros numa tentativa de aumentar o efeito solo, contudo para a temporada de 1983 o efeito de solo foi proibido e foi introduzido o fundo plano.

Durante os próximos anos a Fórmula 1 entrou em estagnação no que toca a grande evoluções na aerodinâmica, apenas sendo desenvolvidos conceitos já existentes na tentativa de otimizar a eficiência aerodinâmica dos carros.

A próxima grande evolução surge no ano de 1990 quando a Tyrrell constrói um carro com o nariz elevado, com o objectivo de aumentar o caudal de ar para o fundo do carro numa tentativa de aumentar o desempenho do fundo do carro. Embora tenha sido verificado que esta configuração criava alguma sustentação, as vantagens trazidas a nível do funcionamento do fundo do carro superavam qualquer desvantagem que a configuração poderia apresentar.



Figura 9 - Tyrrell 019

Esta configuração do nariz embora não tivesse a sua eficácia reconhecida no início depressa tornou-se a única configuração utilizada na Fórmula 1, tendo sido 1996 o último ano em que se viu carros com nariz baixo.

Em 1994 após a morte dos pilotos Roland Ratzenberger e Ayrton Senna foram introduzidas novas alterações regulamentares com o objectivo de diminuir as velocidades em curva dos carros, aumentar a segurança e diminuir a velocidade máxima atingida pelos carros nas rectas.

A nível aerodinâmico a asa traseira foi colocada um pouco mais baixa e limitando-se a altura máxima a que esta poderia estar e a nível do fundo do carro colocou-se uma tábua de madeira, na zona central, com 10 mm de espessura cujo objectivo será aumentar a distância ao solo dos carros de modo a evitar os benefícios da proximidade do carro ao solo. De modo a comprovar que os carros não se aproximam em demasia do solo esta tábua de madeira não poderá chegar ao fim da corrida com menos de 9 mm de espessura em qualquer um dos pontos de fixação, que estão estrategicamente posicionados ao longo da placa.



Figura 10 - Fundo do carro e placa de madeira

Desde 1994 até hoje pouco ou nada mudou a nível aerodinâmico na Fórmula 1 a não ser pequenos componentes que vêm aumentar a eficiência aerodinâmica do carro ou a eficiência aerodinâmica de um determinado sistema não aerodinâmico.

A partir de meados dos anos 90 começaram a aparecer umas derivas de ar ("barge boards") em frente das entradas dos radiadores, com o objectivo de controlar o escoamento e o caudal de ar que vai para o fundo do carro. O

funcionamento destas derivas consiste em desviar algum do escoamento que iria para o fundo do carro, para dentro do sistema de refrigeração.

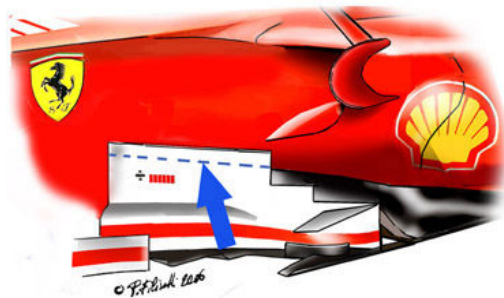


Figura 11 - “Barge board”

Também em meados dos anos 90 começaram a aparecer alguns pequenos apêndices aerodinâmicos que possuíam um duplo objectivo, enquanto alguns tinham a função de criar mais “downforce” outros tinham o objectivo de conduzir o escoamento na direcção pretendida, a estes dispositivos deu-se o nome de “winglets”.



Figura 12 - “Winglet”

A nível da asa dianteira começaram a aparecer “endplates” cada vez mais complexos cujo objectivo para além de aumentar a razão de aspecto da asa, aumentando assim a eficiência da asa. Também começaram a ser introduzidas pequenas derivas cuja função é conduzir o escoamento em torno das rodas dianteiras, numa tentativa de minimizar o arrasto produzido por estas.

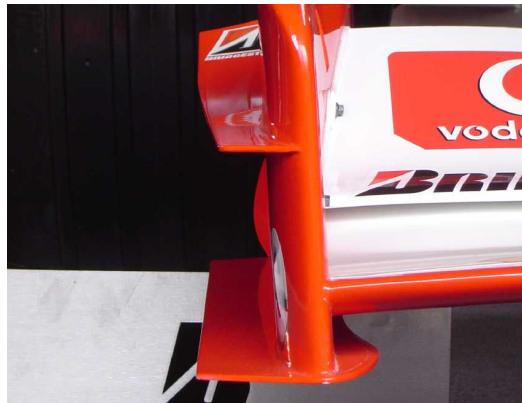


Figura 13 - "Endplate"

Com o aumento das velocidades verificado ao longo dos últimos anos a Federação Internacional do Automóvel aplicou em 2006 um conjunto de regras que vieram perturbar a aerodinâmica dos carros, alterações estas que consistiram em aumentar a distância ao solo da asa dianteira diminuindo os ganhos de desempenho obtidos pela proximidade da asa ao solo, aumentar as dimensões do capot motor numa tentativa de perturbar mais o escoamento para a asa traseira diminuindo assim a sua eficiência e por fim chegar a asa traseira mais para a frente colocando-a na esteira criada pelo capot motor.



Figura 14 - Carro de 2006 com alterações regulamentares

Embora a Federação Internacional do Automóvel se esforce cada vez mais para aumentar a segurança dos carros de Fórmula 1 através da diminuição das velocidades praticadas, a realidade é que as equipas gastam cada vez mais dinheiro de modo a otimizar ao máximo a aerodinâmica dos carros e dos componentes mecânicos, numa tentativa de contrariar as restrições das novas regras.

Para 2008 estão previstas novas regras para a Fórmula 1, regras estas que têm por objectivo corrigir um problema criado pela grande dependência que estes carros têm em relação à aerodinâmica, sendo o maior problema a falta de ultrapassagens. Devido à grande necessidade de um carro ter carga aplicada sobre as rodas para curvar deixou de ser possível curvar demasiado perto do carro da frente, pois isso leva à perda de eficiência da asa dianteira e à consequente tendência do carro subvirar.

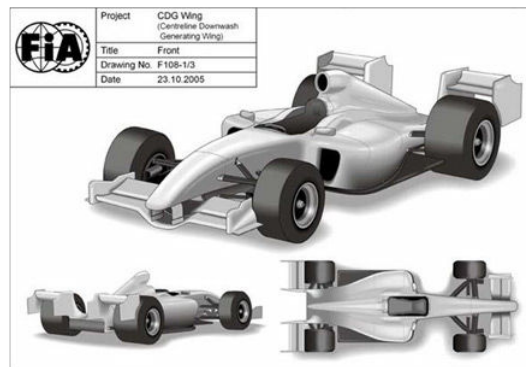


Figura 15 - Conceito CDG para 2008

Estas alterações têm como objectivo reduzir a esteira que irá influenciar o comportamento aerodinâmico do carro que segue atrás. Assim a Federação Internacional do Automóvel pretende que a configuração da traseira do carro passe de uma asa traseira colocada no centro para duas pequenas asas colocadas cada uma atrás da roda traseira, que é uma zona já à partida com esteira e a qual não se poderá alterar. Assim com esta redução da esteira torna-se possível que o carro que segue atrás tenha um pouco mais de ar não perturbado que poderá ser utilizado pela sua asa dianteira.

Algumas questões que têm sido levantadas sobre esta proposta entre as quais como irão as novas asas traseiras comportar-se visto que estão numa zona de esteira? E como irá o carro curvar em circuitos apertados e com rails sem que as asas traseiras sejam danificadas? Devido ao número de questões levantadas a Federação Internacional do Automóvel adiou até 2009 a introdução destas asas de modo a que se possa estudar melhor o seu funcionamento.

Embora a Federação Internacional do Automóvel cada vez mais tente limitar a aerodinâmica e a mecânica dos carros de Fórmula 1, sendo a aerodinâmica uma ciência ainda com muitos segredos, as equipas não poderão baixar os braços face às regras pois mais cedo ou mais tarde estes segredos serão desvendados e abrir-se-ão novas portas para o desenvolvimento aerodinâmico dos carros.

1.3 A importância da aerodinâmica na Competição Automóvel

A aerodinâmica é uma área da mecânica dos fluidos que muitos não consideram como importante pois existe muita gente que não compreende a importância do que não se vê. Contudo, a aerodinâmica é uma área com que todos convivemos diariamente, sem que nos apercebamos. Desde os vórtices criados no fumo de um cigarro até ao vento, estando todas as nossas actividades influenciadas pelo ar.

Assim e devido a esta forte interacção entre o ar e os corpos é necessário ter algumas considerações no projecto de um carro. Estas considerações são bastante complexas pois lidam com os escoamentos de modo a que estes

tragam benefícios ao desempenho do carro sem trazer desvantagens, tal como veremos mais adiante.

Existem duas forças aerodinâmicas que têm uma grande influência no comportamento de um carro, a força de “downforce” e a resistência aerodinâmica. No primeiro caso trata-se de uma força que contribui positivamente para o desempenho do carro, aumentando a capacidade de curvar do carro, contudo os aumentos nesta força influenciam a segunda força, pois o aumento da força de “downforce” provoca o aumento da resistência aerodinâmica induzida, logo o desenho de um carro de Fórmula 1 consiste num compromisso de modo a maximizar a força de “downforce” e minimizando a força de resistência aerodinâmica que atrasa a progressão do carro.

1.4 “Downforce”

A expressão “downforce” vem do inglês e significa força vertical descendente, contudo esta força não passa da sustentação invertida.

Ao contrário de uma aeronave, cujo objectivo é criar uma força vertical que empurra as asas no sentido de baixo para cima, num carro de competição o objectivo consiste em empurrar o carro para baixo com a maior força possível de modo a variar o coeficiente de atrito entre os pneus e o asfalto, permitindo então curvar o mais depressa possível, devido ao aumento do atrito entre o pneu e o asfalto. Assim a forma mais simples de criar esta sustentação invertida consiste em colocar asas invertidas nos carros.



Figura 16 - Diagrama do “downforce”

A criação de “downforce” só por si não afecta o desempenho do carro, o que irá provocar grandes melhorias no desempenho do carro é a influência que o “downforce” tem sob o desempenho dos pneus do carro.

Em muitos materiais o seu coeficiente de atrito permanece inalterado independentemente da força aplicada sob o corpo. Contudo a borracha é um material que cujo coeficiente de atrito altera-se consoante a força aplicada ao corpo.

Da física mecânica sabemos que a força de atrito depende da força normal aplicada ao corpo multiplicada pelo coeficiente de atrito, segundo a fórmula:

$$F_{\text{atrito}} = \mu \times F_{\text{Normal}}$$

Onde μ representa o coeficiente de atrito e F_{Normal} representa a força normal aplicada ao corpo. Esta força normal consiste na força que empurra o corpo contra o plano em que este se encontra a movimentar, sendo a sua aplicação verificada segundo um plano perpendicular ao plano de deslocamento.

Assim poderemos substituir a força normal por:

$$F_{Normal} = \text{Peso} + \text{"downforce"} \Leftrightarrow F_{Normal} = mg + \frac{1}{2} C_L S \rho v^2$$

Onde m representa a massa do corpo, g a aceleração da gravidade ($9,81 \frac{m}{s^2}$), C_L o coeficiente de sustentação, S a área de referência, ρ a massa volúmica do ar e v a velocidade do carro.

Também da física mecânica sabemos que a força centrífuga, num movimento circular com raio constante, poderá ser calculada através da seguinte fórmula:

$$F_{centrifuga} = m \frac{v^2}{r}$$

Onde r representa o raio de curvatura.

De modo a que um carro possa curvar no limite e sem escorregamento sabemos que a aceleração centrífuga terá que ser obrigatoriamente igual à força de atrito produzida pelas rodas. Aplicando as fórmulas anteriores obtemos a seguinte equação:

$$F_{atrito} = F_{centrifuga} \Leftrightarrow \mu \times \left(mg + \frac{1}{2} C_L S \rho v^2 \right) = m \frac{v^2}{r}$$

Reorganizando a equação podemos calcular a velocidade média de um carro a descrever uma curva de raio constante para determinadas condições:

$$v = \sqrt{\frac{r \times \mu \times (mg + L)}{m}}$$

Neste equação optou-se por colocar L ("downforce") pois através da variação deste valor iremos demonstrar a diferença de desempenho de um carro com e sem "downforce" em curva.

Admitindo que temos os seguintes dados:

m - massa do carro	600 kg
r - raio de curvatura	100 m
μ - coeficiente de atrito dos pneus	0,9

g - aceleração da gravidade	$9.81 \frac{m}{s^2}$
$L0$ – “downforce” do carro 1	0 N
$L1$ – “downforce” do carro 2	2500N

Calculando a velocidade média na curva para o caso em que o carro não possui “downforce” ($L0$), obtemos:

$$v = 29.7m/s$$

E calculando a velocidade média em curva para o caso em que o carro tem 2500 N de “downforce”, obtemos:

$$v = 35.47m/s$$

Embora estes valores não pareçam muito significativos, sabemos também que da física mecânica a velocidade média consiste na variação da distância percorrida em função do tempo, ou seja:

$$v = \frac{dx}{dt}$$

Logo poderemos calcular o tempo que cada carro leva a descrever a curva:

$$dt = \frac{dx}{v}$$

De modo a calcular a distância percorrida, iremos considerar uma trajetória com um arco de um quarto de circunferência com 100 metros de raio, ficando com:

$$x = \frac{2\pi r}{4} = 157\text{metros}$$

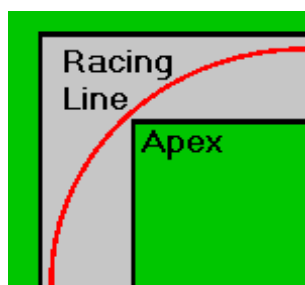


Figura 17 – Trajetória da curva

E, assim, obtemos os tempos que cada carro leva a efectuar a curva:

Carro 0 ($L0$)	$t = 5.29s$
Carro 1 ($L1$)	$t = 4.44s$

Como podemos verificar o carro que tem “downforce” consegue descrever a curva mais rapidamente que o carro que não dispõe de “downforce”, contudo esta vantagem em curva poderá ser uma desvantagem nas rectas, como se explicará mais adiante.

Nesta pequena demonstração tivemos em consideração que o coeficiente de atrito do pneu com o asfalto permanece inalterado, contudo, tal como mencionado anteriormente, o coeficiente de atrito de um pneu varia consoante a carga vertical (descendente) aplicada sobre ele.

Quando uma equipa inicia o projecto do seu novo carro têm de ter em consideração os dados fornecidos pelo fabricante dos pneus. Estes dados consistem nas curvas de desempenho dos pneus, que são curvas indicadoras da tracção lateral máxima do pneu (ou força centrífuga máxima admitida pelo pneu sem escorregamento) em função da carga vertical aplicada sobre este. Sendo a tracção a interacção da estrada com o pneu ou como vulgarmente é chamada a capacidade do pneu aderir ao asfalto. Quando um pneu está em escorregamento a sua tracção é praticamente nula e o seu coeficiente de atrito é mais baixo.

Através destes gráficos é possível obter os valores do coeficiente de atrito do pneu. Assim, embora a demonstração anterior nos mostre que um carro com “downforce” consegue descrever a curva mais depressa, na realidade o seu tempo a curvar variará consoante o desempenho do pneu.

Poderemos mais uma vez através das equações anteriormente indicadas calcular o coeficiente de atrito estático do pneu:

$$F_{centrifugal} = \mu \times F_{Normal} \Rightarrow \mu = \frac{F_{centrifugal}}{F_{Normal}}$$

No caso de um pneu, tal como em todos os materiais, existem dois tipos de coeficiente de atrito, o coeficiente de atrito estático, quando a velocidade entre o corpo e o plano de deslocamento é nula e o coeficiente de atrito dinâmico, quando há escorregamento entre o plano de deslocamento e o corpo. No caso de um pneu em rotação, embora este esteja a rodar, poderemos considerar o seu coeficiente de atrito estático na condição de que a velocidade periférica do pneu é igual à velocidade do plano de deslocamento; logo, a velocidade relativa é nula, o que significa que não existe escorregamento entre o pneu e o plano de deslocamento, que no caso de um veículo de Fórmula 1 é a pista.

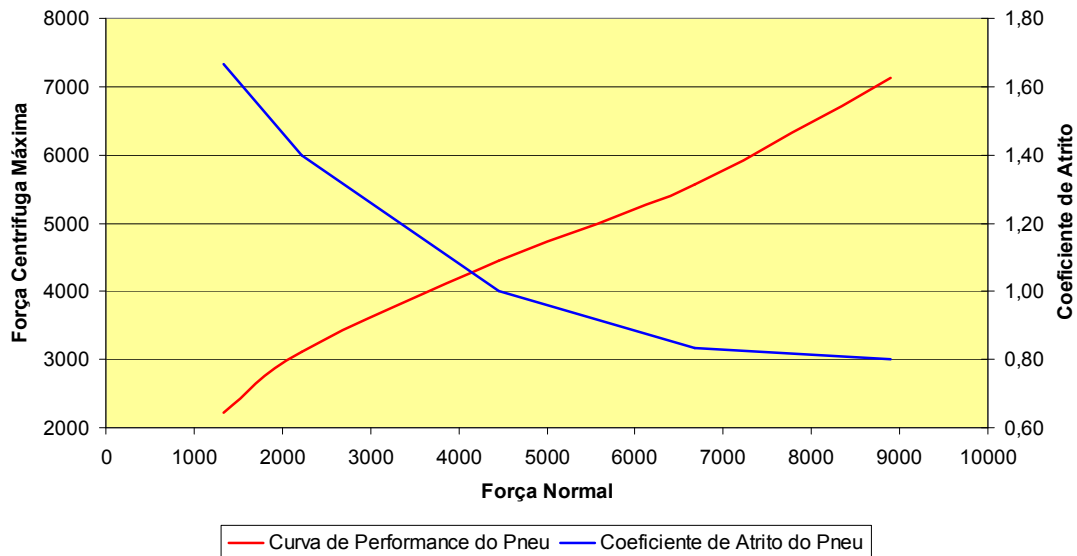


Figura 18 - Gráfico de desempenho do pneu

Através da análise do gráfico de desempenho do pneu (ver Figura 4) pode concluir-se que, neste caso, o aumento da força normal vai levar a um aumento da força centrífuga máxima que o pneu pode suportar. Contudo, também é de notar que, no caso deste pneu, o seu coeficiente de atrito estático diminui com esse aumento de carga vertical; esta diminuição deve-se ao facto de o pneu perder eficiência com o aumento da carga vertical.

Esta pequena demonstração apenas serviu para realçar a importância da aerodinâmica na performance de um carro, tendo sido utilizados apenas valores exemplificativos nos cálculos. Contudo, no cálculo do coeficiente de atrito do pneu foi utilizado um gráfico que corresponde a um pneu real, mas que não representa o comportamento global de todos os pneus do mercado, pois cada pneu apresenta diferentes compostos de borracha, construções e temperaturas de funcionamento. Existem alguns compostos de borracha nos quais se verifica um aumento no coeficiente de atrito, ao contrário do que acontece no exemplo exposto. Nestes casos ocorre um aumento da eficiência do pneu, contudo só em alguns casos particulares é que se verifica este comportamento, tal como nos compostos muito macios utilizados em provas contra-relógio, como é o caso dos treinos de qualificação.

1.5 Resistência aerodinâmica

Tal como todos os corpos que estão em contacto com o ar um carro de Fórmula 1 possui uma resistência aerodinâmica, pode ser decomposta em resistência viscosa, criada pela viscosidade do fluido em que o corpo se encontra, neste caso o ar, a resistência induzida, produzido pela criação de sustentação, e por fim o atrito de forma ou de pressão causado pela passagem do corpo através do fluido e desvio do fluido da sua trajectória normal.

Esta força aerodinâmica é bastante importante pois é ela que atrasa a progressão do carro, sendo necessário um cuidado especial no projecto do carro na tentativa de minimizar este efeito, principalmente o atrito induzido e o atrito de pressão, visto que estes são os tipos de resistência aerodinâmica que se encontra em maioria num carro de Fórmula 1, podendo em certos casos ser praticamente desprezado o atrito viscoso.

Embora a resistência aerodinâmica possa ser calculada através da fórmula, $D = \frac{1}{2} C_D S \rho v^2$ é necessário recorrer ao túnel de vento ou a métodos numéricos de modo a calcular o coeficiente de resistência aerodinâmica, com precisão devido às geometrias complexas que um carro de Fórmula 1 possui.

1.6 CAD

O termo CAD surge do inglês “Computer Aided Design”, que poderá ser traduzido para português como “projecto assistido por computador”. Desde o aparecimento dos computadores que as equipas de projecto nas mais variadas áreas têm tentado utilizar CAD de modo a simplificar todo o processo criativo, pois evita algumas etapas que anteriormente eram necessários até o componente entrar na linha de produção. Com o aparecimento dos sistemas CAD os componentes poderão ser desenhados, estudados estruturalmente, termicamente ou aerodinamicamente e ser aprovados passando imediatamente para a linha de produção, sendo apenas necessário um projectista para efectuar todas estas etapas.

Em meados dos anos 50 as construtoras aeronáuticas e automobilísticas começaram a desenvolver modelos matemáticos que permitiam a definição de superfícies curvas complexas e de geometrias tridimensionais simples, contudo estes modelos iniciais não se apresentavam de forma interactiva, com o projectista, num ecrã.

Em 1963 com o aparecimento do software Sketchpad, dá-se um grande salto no projecto de componentes e sistemas. Este software desenvolvido pelo Dr. Ivan Sutherland, do MIT (Massachusetts Institute of Technology), consistiu no primeiro software que permite em tempo real a alteração do desenho sem ser necessário reformular o modelo matemático. Os desenhos feitos são mostrados ao projectista pelo ecrã do computador e este altera-os utilizando uma caneta de luz.



Figura 19 – Dr. Sutherland a trabalhar no Sketchpad

Os primeiros softwares comerciais requeriam computadores bastante potentes, para a altura, e consequentemente com custos bastantes elevados, assim apenas as grande empresas da indústria aeronáutica e automóvel tinham a capacidade de adquirir máquinas com as capacidades necessárias. Estes softwares consistiam em aplicações relativamente limitadas e orientadas para uma só tarefa.

Outro ano importante foi o ano de 1971, ano em que o Dr. P.J. Hanratty, fundador da Manufacturing and Consulting Services Inc., disponibilizou o código fonte do software ADAM (Automated Drafting And Machining) a todas as companhias interessadas de modo a que estas pudessem desenvolver os seus próprios pacotes comerciais de software.

À medida que os computadores pessoais começaram a ser comercializados a preços mais acessíveis, os programadores começaram a desenvolver novos softwares, tal como o CATIA (Dassault Systems), o Uni-solid (Unigraphics) ou o Romulus (Shapedata), todos colocados à venda em 1981. Embora estes softwares estivessem à venda ao público, a massificação da utilização deste género de software ocorreu nos anos 90, do século XX, com o AutoCAD (Autodesk).

Embora no início os softwares apenas permitissem a visualização bidimensional do componente a ser desenhado, segundo as vistas utilizadas num desenho manual, a rápida evolução destes softwares levou ao aparecimento de softwares que permitem a visualização dos componentes tridimensionalmente, usando qualquer vista que o projectista deseje.

Nos últimos anos os fabricantes dos softwares de desenho têm vindo a aumentar as capacidades dos seus produtos através a inclusão de módulos que permitem a análise estrutural do componente, a programação de máquinas utilizadas na fabricação, o desenho de moldes, o projecto de instalações eléctricas, etc. Este aumento das capacidades do software surge com a tentativa de evitar que as empresas utilizadoras do software tenham a necessidade de adquirir vários softwares, licenças e de formar os projectistas em cada software, reduzindo assim o custo total dum projecto e também o tamanho do gabinete de projecto.

1.7 Dassault Systems – CATIA

O software CATIA foi criado pela Avions Marcel Dassault para ser utilizado no desenvolvimento de aeronaves da empresa. Contudo na sua fase inicial era apenas conhecido por CATI (Conception Assistée Tridimensionnelle Design), tendo sido baptizado em 1981 por CATIA, altura em que foi criada uma empresa subsidiária, responsável pelo desenvolvimento e marketing do software, a Dassault Systems.

Este software trata-se de um dos softwares de CAD mais multifacetados do mercado, permitindo o desenho tridimensional, bidimensional, análise de elementos finitos, estudos de ergonomia, projecto compósito, estudo de instalações eléctricas, programação de CNC (maquinação controlada computacionalmente).

1.8 Aerodinâmica na Fórmula 1

Um carro de Fórmula 1 é constituído por um grande número de componentes aerodinâmicos que são constantemente alterados e melhorados. Muitos desses componentes não chegam a ser utilizados em corrida, pois num mundo tão competitivo como o da Fórmula 1 em certas circunstâncias leva menos tempo fabricar a peça do que testá-la recorrendo a um túnel de vento ou ao modelos computacionais. Assim, muitas peças são colocadas directamente nos carros e vão sendo testadas através da análise do seu comportamento com auxílio de sistemas de telemetria e aquisição de dados do carro.

Um carro de Fórmula 1 pode ser dividido em 6 elementos fundamentais que influenciam o escoamento em volta do carro:

- Nariz e asa dianteira
- Asa traseira
- Fundo
- Caixa de ar e capot
- Rodas
- Apêndices aerodinâmicos

1.8.1 Nariz e asa dianteira

Estes são considerados por muitos como os dois componentes mais importantes da aerodinâmica de um carro de Fórmula 1, não tanto pela influência que têm no comportamento do carro mas sim no escoamento em torno do carro.

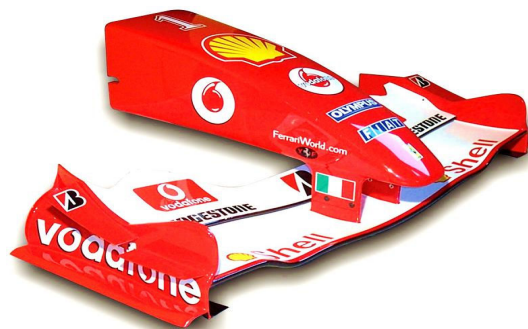


Figura 5 - Conjunto asa dianteira e nariz

Sendo estes os dois componentes que entram em contacto em primeiro lugar com o escoamento de ar, desempenham um importante papel na definição do escoamento em torno do carro, pois um mau projecto destes elementos poderá levar à falta de eficiência de outros componentes que dependem do escoamento que sai deste elementos.

1.8.1.1 Nariz

Este elemento consiste no primeiro elemento do carro a entrar em contacto com o escoamento do ar e por isso tem um dos papéis mais importantes na eficiência aerodinâmica global do carro.

Devido à sua geometria extremamente complexa, um carro de Fórmula 1 tem uma grande tendência para criar a separação do escoamento, quando se desloca pelo ar. Por isso, o projecto correcto deste componente é da maior importância para evitar a separação do escoamento pouco depois do bordo de ataque onde se verificam gradientes de pressão adversos de grande intensidade.

Outra fonte de preocupação que os projectistas têm consiste nos apoios que o nariz tem para segurar na asa dianteira e transmitir as cargas para o chassis, estes suportes consistem em duas barras verticais paralelas. No projecto destes elementos, para além do problema de resistência estrutural, é necessário ter muita atenção à distância entre elas de modo a evitar a interacção entre a camada de limite de cada um dos elementos, pois poderá levar a uma perda de eficiência aerodinâmica da asa dianteira.

Contudo, esta estrutura não serve apenas de elemento aerodinâmico, pois sendo este o primeiro elemento a entrar em contacto com o escoamento também se torna como o primeiro elemento a bater em caso de uma colisão frontal. Assim, o nariz também consiste num elemento de segurança do carro que tem de garantir os requisitos mínimos impostos pelo Regulamento Técnico da Fórmula 1, editado pela Federação Internacional do Automóvel.

1.8.1.2 Asa dianteira

A asa dianteira consiste num elemento do carro que serve para criar “downforce” na frente do carro de modo a aumentar a tracção disponível nas rodas dianteiras. Este elemento aerodinâmico produz na ordem de 25 a 30% de toda a força aerodinâmica do carro, sendo o seu projecto bastante importante tal como no caso do nariz, pois todo o escoamento a jusante é influenciado pela asa dianteira

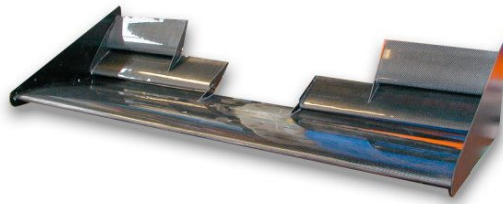


Figura 6 - Asa Dianteira

A asa dianteira consiste num elemento do carro constituído por diversos elementos que também são encontrados nas asas de aeronaves, assim a asa dianteira pode ser decomposta nos seguintes elementos:

- asa
- “flap”
- “end plate”
- “flap” de bordo de ataque

Asa

A asa de um carro de Fórmula 1 não passa de uma asa invertida e sob o efeito de solo, no caso da asa dianteira. Tal como uma asa de avião as asas utilizadas na Fórmula 1 têm alguns requisitos particulares, devido à baixa velocidade, à baixa razão de aspecto² e devido ao efeito de solo.

Assim, ao longo dos anos foram desenvolvidos alguns perfis alares específicos para carros de competição, tais como os perfis Benzing (Be), criados pelo Engenheiro Enrico Benzing. O sistema de classificação de um perfil Be consiste em 6 algarismos, onde os dois primeiros algarismos representam, em percentagem, a espessura máxima do perfil, o terceiro algarismo a posição da espessura máxima, em percentagem de corda. O quarto e quinto algarismo

² Razão entre a envergadura e a corda da asa.

referem-se à flecha do perfil, em percentagem da corda e o sexto algarismo a posição da flecha do perfil em percentagem da corda.

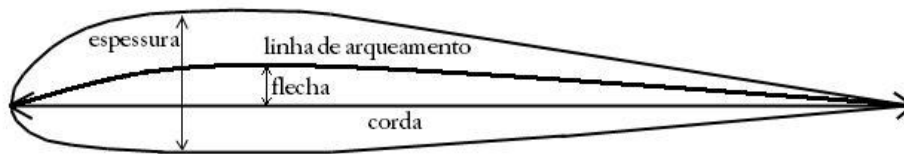


Figura 20 - Nomenclatura da asa

Embora os perfis Benzing sejam bastante utilizados em praticamente todas as categorias de competição automóvel, existem algumas equipas que possuem elementos cuja única função consiste estudar e alterar perfis de modo a que se obtenha um melhor desempenho para determinadas condições.

Assim, de modo a calcular a sustentação criada por uma asa e a resistência aerodinâmica verificada, podemos aplicar as fórmulas vulgarmente utilizadas para realizar estes cálculos:

$$L = C_L \times 0,5 \times S \times \rho \times v^2$$

$$D = C_D \times 0,5 \times S \times \rho \times v^2$$

Onde L consiste na sustentação, C_L o coeficiente de sustentação, D a força de resistência aerodinâmica, C_D o coeficiente de resistência aerodinâmica, S a área de referência da asa, ρ a massa volúmica do ar e v a velocidade do escoamento não perturbado pelo qual a asa se desloca (ou no referencial do observador a velocidade do carro). De modo a obter o valor dos coeficientes mencionados as equipas têm de recorrer a ensaios no túnel de vento e a estudos numéricos.

Outra questão a ter em consideração consiste no facto de a asa dianteira ser um elemento que depende da proximidade ao solo para obter valores ainda mais elevados do coeficiente de sustentação sem um grande aumento do coeficiente de resistência aerodinâmica, assim aumentando a eficiência aerodinâmica.

No caso de uma asa de um carro de competição a sua proximidade ao solo produz uma secção convergente entre a asa e o solo, que devido à conservação de massa irá acelerar o escoamento e consequentemente diminuir a pressão no extradorso da asa, o que levará a um aumento do “downforce” em comparação com a mesma asa sem estar em proximidade com o solo.

Embora teoricamente quanto menor a altura ao solo maior será o coeficiente de sustentação, devido à maior velocidade verificada graças a conservação de massa, contudo tal não se verifica pois existe um limite mínimo para a altura ao solo, visto que, devido à interação da camada limite da asa com o solo existe uma diminuição da eficiência aerodinâmica da asa quando a altura ao solo é inferior a este limite mínimo.

“Flap”

Tal como nos perfis alares utilizados na aeronáutica, existe um ângulo de ataque máximo para o funcionamento da asa. A partir deste ângulo o escoamento separa e a asa entra num regime de funcionamento que designa “em perda”.

Assim, da mesma forma que na aeronáutica, são utilizados, os “flap”s para aumentar o coeficiente de sustentação máximo para um determinado valor do ângulo de ataque.

Embora na aviação sejam utilizados várias configurações de “flap” (simples, separada, ou com fenda), na competição automóvel quando se recorre à utilização de um “flap”, opta-se sempre por um “flap” com fenda. A selecção de um “flap” com fenda deve-se ao facto de este tipo de “flap” contribuir de modo a evitar a separação, do escoamento no extradorso da asa, devido à camada limite.

Especial cuidado é necessário para o desenho da fenda entre a asa e o “flap”, visto que, o tamanho e posição da fenda irá influenciar a forma como o escoamento no extradorso no conjunto asa-“flap” se comporta. Não existe uma receita para o desenho da fenda, contudo este desenho deverá ter em consideração a posição do “flap” e a geometria do bordo de ataque deste de modo a permitir que o supro da fenda não se separe do “flap”, o que levaria à ineficiência do mesmo. O funcionamento da fenda entre a asa e o “flap” é explicado pelo efeito de Coanda. Este efeito leva a que um escoamento se mantenha colado a uma superfície desde que esta não tenha alterações à sua geometria demasiado acentuadas. Assim no caso de a fenda estar correctamente desenhada o escoamento curvará e acompanhará a geometria do “flap”, evitando assim a separação do escoamento. Contudo, se a fenda for incorrectamente desenhada o escoamento poderá não acompanhar a curvatura do “flap”, separando-se e provocando um aumento da resistência aerodinâmica.

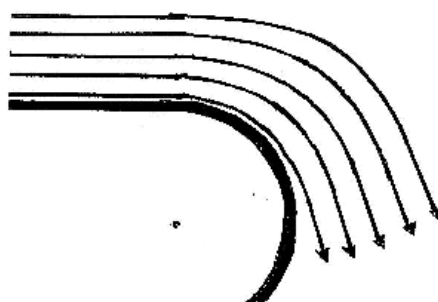


Figura 21 - Efeito de Coanda

Embora hoje em dia os regulamentos proibirem a utilização de mais que 3 elementos numa asa (corpo principal mais dois “flaps”, por exemplo) em tempos as utilização de conjuntos de 4 “flaps” chegaram a ser utilizados, visto que a utilização de “flaps” seguidos uns aos outros irá permitir a utilização de ângulos de ataque do conjunto maiores, sem que ocorra a separação do escoamento, originando forças verticais maiores.

“Endplate”

Este elemento consiste numa placa vertical colocada na ponta da asa de modo a diminuir a resistência aerodinâmica induzida, resistência esta causada devido à existência de vórtices na ponta da asa, vórtices marginais, que são tanto maiores quanto maior for o “downforce” criado. O seu nome aparece da combinação de duas palavras em inglês, “end” que significa fim ou final e “plate” que significa placa.

O aparecimento destas estruturas na ponta das asas deve-se à existência de vórtices marginais, causadores da resistência induzida. Este tipo de resistência deve-se à criação de sustentação. O aumento da sustentação provoca um aumento da diferença de pressão entre o extradorso e intradorso que leva ao aparecimento de vórtices na ponta da asa devido à mistura do escoamento do intradorso com o do extradorso, que leva à diminuição da sustentação produzida pela asa e ao mesmo tempo leva a um aumento da resistência aerodinâmica. Este fenómeno levou à necessidade de um componente que evitasse este fenómeno, assim surgiram os “endplates”.

Embora apenas um estudo detalhado recorrendo a um túnel de vento ou a modelos numéricos possa demonstrar qual o ganho na eficiência da asa que a colocação de “endplates” poderá trazer, sabemos que a eficiência depende da razão de aspecto, razão entre a envergadura e corda, da mesma, como veremos mais adiante.

Começando pela fórmula da eficiência aerodinâmica temos:

$$\eta_{aero} = \frac{C_L}{C_D}$$

Contudo, sabemos que o coeficiente de resistência aerodinâmica depende de duas componentes, o coeficiente de resistência aerodinâmica induzido (C_{Di}) e o coeficiente de resistência aerodinâmica para sustentação nula (C_{D0}), obtendo assim a seguinte equação:

$$\eta_{aero} = \frac{C_L}{C_{Di} + C_{D0}}$$

Aplicando a equação para o coeficiente de atrito induzido:

$$C_{Di} = \left(\frac{1}{\pi \times AR} \right) \times C_L^2$$

Assim, obtemos a seguinte equação para a eficiência aerodinâmica da asa:

$$\eta_{aero} = \frac{C_L}{\left(\frac{1}{\pi \times AR}\right) \times C_L^2 + C_{D_0}}$$

Através da análise da equação concluímos que a eficiência aerodinâmica da asa dependerá de dois parâmetros que estão associados ao desempenho do perfil alar, o C_L e o C_D , e um parâmetro que depende apenas da geometria da asa, a razão de aspecto, AR .

Os valores relacionados com o desempenho do perfil alar podem ser obtidos através da análise do ângulo de ataque do perfil e da análise das curvas de coeficiente de sustentação versus ângulo de ataque (C_L vs α) e através da análise da curva de polar de resistência aerodinâmica do perfil (polar de Eiffel).

Assim, a razão de aspecto consiste num dos poucos elementos que o projectista poderá mexer, após a selecção do perfil: a utilização de “endplates” irá aumentar a razão de aspecto da asa e consequentemente a eficiência aerodinâmica da asa. Embora apenas através de ensaios no túnel de vento ou através de modelos numéricos poderemos obter os valores correctos da influência do “endplate” neste parâmetro. Contudo, poderemos utilizar a seguinte expressão de modo a obter um valor aproximado:

$$AR = AR_{asa} + \left(1 + 1,9 \times \frac{h}{b}\right)$$

Onde AR_{asa} é a razão de aspecto da asa sem endplates, h é a altura do “endplate” e b a envergadura. Esta fórmula é apenas válida para “endplates” colocados com a sua linha média, alinhada com a linha de corda da asa.

“Flap” de bordo de ataque

Este elemento consiste num elemento que é frequentemente utilizado na aviação de modo a aumentar o ângulo de ataque máximo que a asa poderá ter sem que o escoamento separe no extradorso. Este fenómeno é conseguido através da utilização de uma fenda perto do bordo de ataque da asa, que irá evitar a separação do escoamento perto do bordo de ataque, da mesma forma que a fenda evita a separação no “flap”

Contudo, esta solução não é muito utilizada na Fórmula 1, visto que regra geral o corpo principal da asa não possui nem um grande ângulo de ataque nem um grande arqueamento, logo não corre o risco de separação do escoamento perto do bordo de ataque, sendo a maioria do “downforce” obtido através da utilização de “flaps”.

1.8.2 Asa traseira

A asa traseira é um dos elementos que mais resistência aerodinâmica cria sendo responsável por cerca de 30 a 35% do total e apenas cerca de 35% de todo o “downforce”, tornando-o um elemento com uma baixa eficiência aerodinâmica.



Tal como numa asa dianteira, a asa traseira é constituída por diversos elementos, iguais aos da asa dianteira.

Existe contudo uma diferença entre a asa dianteira e a asa traseira, esta diferença consiste no facto da asa traseira não funcionar sob o efeito do solo, pois a colocação da asa traseira demasiado em baixo iria baixar a sua eficiência, devido aos componentes que o carro possui à sua frente, que levam à criação de uma zona turbulenta.

Contudo, para além dos elementos visíveis na parte superior da asa e colocados o mais altos possíveis de modo a receber um escoamento o menos perturbado possível, existem alguns elementos de baixa eficiência na base da asa utilizados de modo a criar um gradiente de pressão que contribua para o eficaz funcionamento do fundo plano e difusor, elementos aerodinâmicos utilizados no fundo do carro de modo a aproveitar o efeito de solo.

Embora estes elementos mais baixos possam reduzir a eficiência dos elementos principais da asa, caso o ganho criado por estes elementos mais baixos, no difusor e fundo plano, seja superior às perdas verificadas nas asas torna-se bastante vantajoso a sua utilização. Isto pois os ganhos verificados em “downforce” no fundo do carro, praticamente não levam a aumentos do coeficiente de resistência aerodinâmica.

1.8.3 Fundo do carro

O fundo do carro é o elemento que tem maior eficiência aerodinâmica num carro de Fórmula 1 e que produz cerca de 40% de todo o “downforce”.

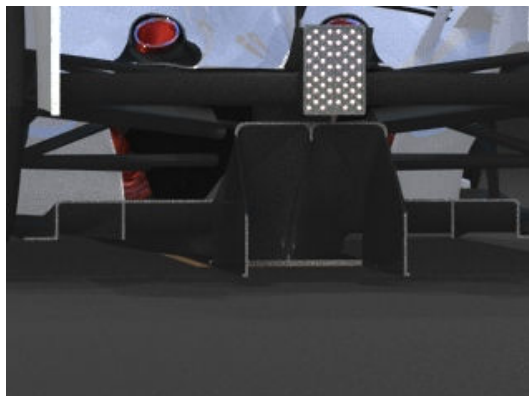


Figura 9 - Difusor

O fundo de um carro de Fórmula 1 está dividido em 2 elementos, um elemento plano entre as rodas da frente e o plano vertical tangente à frente das rodas traseiras e um segundo elemento que consiste num difusor.

A primeira parte do fundo de um carro consiste numa secção plana que como objectivo acelerar e manter um escoamento acelerado por baixo do carro, criando assim uma baixa pressão por baixo do carro, originando “downforce”, sem que haja um grande incremento na resistência aerodinâmica.

Esta aceleração do escoamento é possível devido à proximidade entre o fundo e o solo, da mesma forma como explicado anteriormente no capítulo referente à asa dianteira. De modo a aumentar o desempenho do fundo do carro ainda é possível variar o caudal de ar que o alimenta, quer através da variação da altura ao solo, quer através do desenho de uma secção de entrada convergente ou de outros elementos aerodinâmicos que forcem o escoamento para a secção de entrada do fundo do carro.

A secção de saída do fundo do carro consiste num difusor cujo objectivo é diminuir a velocidade do escoamento que passa por baixo do carro, assim aumentando a pressão deste escoamento, de modo a que a pressão do escoamento seja próxima da pressão atmosférica, diminuindo assim a resistência aerodinâmica de pressão.

De modo a auxiliar o funcionamento do difusor é frequentemente utilizado um elemento mais baixo na asa traseira que tem como objectivo diminuir a pressão na zona do difusor na tentativa de aumentar o caudal de escoamento na secção plana do fundo do carro.

O fundo do carro é um dos elementos mais sensíveis encontrados num carro pois este trabalha recorrendo em proximidade do solo. Tal como mencionado anteriormente existe uma altura ao solo ideal, que permite maximizar a

eficiência aerodinâmica do componente. Contudo, embora possamos ajustar esta altura, um carro em pista tem uma grande variação de arfagem que leva a variações de altura ao solo, assim como de rolamento, que leva a uma eficiência variável ao longo de uma volta.

1.8.4 Caixa-de-ar e capot-motor

A caixa-de-ar consiste num elemento aerodinâmico cujo seu desenvolvimento é de capital importância pois este é o único elemento aerodinâmico que poderá influenciar o desempenho do motor.



Figura 10 - Caixa de ar

Este elemento consiste numa entrada de ar colocado por cima e atrás do capacete do piloto. Após a entrada de ar encontramos um canal que conduz o ar até aos canais de admissão do motor.

Como sabemos a potência de um motor está directamente relacionada com a pressão de ar na admissão. Quando esta pressão é elevada verifica-se que o motor produz mais potência, assim o objectivo da caixa-de-ar consiste em aumentar a pressão de estagnação verificada dentro da conduta da caixa-de-ar e consequentemente na admissão do motor. Contudo durante a fase de projecto convém ter em consideração que todos os canais de admissão para o motor terão que ter a mesma pressão, de modo a que cada cilindro tenha a mesma pressão.

Assim a caixa-de-ar tem que ser colocada de modo a que esteja num ponto no qual recebe o maior caudal de ar possível sem que perturbe em demasia o escoamento em torno do carro, de modo a evitar um aumento da resistência aerodinâmica.

O capot (ou capot-motor) consiste numa estrutura que visa apenas cobrir todos os componentes mecânicos e sistemas, situados na traseira do mesmo. Esta estrutura tem o seu projecto bastante influenciado pela geometria da conduta

ar que liga à caixa de ar. Embora nos últimos anos se tenha verificado algumas alterações que limitam a dimensão do capot, por motivos publicitários, este tem também o papel de servir de “condicionador” do escoamento para a asa traseira.

1.8.5 Rodas

As rodas consistem na maior “dor de cabeça” que os aerodinamicistas têm durante o desenvolvimento de um carro de Fórmula 1. A definição de um carro do tipo “Fórmula” consiste num carro cujas rodas, suspensão e piloto não se encontram cobertas, o que impede a utilização de carnagens de modo a aumentar a eficiência aerodinâmica das rodas.

Estando descobertas, as rodas tornam-se geradores de resistência aerodinâmica e são responsáveis por cerca de 40% de toda a resistência aerodinâmica de um carro de Fórmula 1.

Um dos maiores problemas que os aerodinamicistas enfrentam trata-se do facto de elas, ao rodarem, alterarem o escoamento em torno de si. Para além disso, a sua velocidade angular é directamente proporcional à velocidade de deslocamento do carro, o que leva a que se verifiquem diferentes escoamentos consoante a velocidade a que o carro se desloca.

Outra situação a ter em conta é o facto das rodas dianteiras virarem segundo um eixo vertical permitindo assim que o carro descreva as trajectórias curvilíneas necessárias para percorrer o circuito. Estas alterações do ângulo de viragem das rodas também levam a que exista alterações no escoamento em torno do carro.

Assim as rodas podem ser consideradas como uns dos elementos que mais problemas dão aos projectistas devido à complexidade e alterações ao escoamento em torno do carro que poderão induzir.

1.8.6 Apêndices aerodinâmicos

Na última década a Fórmula 1 tem-se assistido ao aparecimento de diversos componentes aerodinâmicos, que visam aumentar a eficiência aerodinâmica dos carros.

Contudo, ao contrário do que a maioria das pessoas pensam, estes componentes não se tratam exclusivamente de superfícies geradoras de “downforce”, havendo mesmo algumas que criam alguma sustentação.

A maioria destes componentes apenas cria resistência aerodinâmica, o que poderá parecer bastante absurdo. Contudo, os estudos computacionais permitiram que o escoamento fosse visualizado pormenorizadamente o que possibilitou a sua melhor compreensão. Assim, as equipas começaram a criar

novos componentes que alteram o escoamento em torno do carro, sem que produzam uma quantidade de “downforce” significativa.

Estes componentes regra geral têm um objectivo similar ao dos geradores de vórtice utilizados na aviação, embora com objectivos diferentes. No caso da aviação o objectivo consiste em torna um escoamento turbulento na tentativa de atrasar a separação. No caso da competição automóvel para além de utilizados de modo a atrasar a separação do escoamento nas asas, também são utilizados de modo a evitar a separação do escoamento em outras áreas do carro, como por exemplo no fundo plano ou mesmo nos componentes com geometrias complexas presentes nos carros.

1.8.6.1 “Horns”

No início da temporada de 2005 a equipa McLaren Mercedes surgiu nos testes realizados no sul de Espanha com uns apêndices colocados atrás do capacete do piloto, que depressa foram alcunhados de “horns” (cornos).

Estes componentes tinham como objectivo criar um vórtice de cada lado do carro orientados cada um para o endplate do seu lado e com rotação no sentido contrário ao do vórtice criado pela ponta da asa. Com isto a equipa pretendia tentar diminuir a resistência aerodinâmica induzida.



Figura 22 – “Horns”

1.8.6.2 “Winglets”

Estes componentes colocados à frente das rodas traseiras apareceram em meados da década de 90, do século passado, e numa fase inicial tinham como objectivo a criação de “downforce”, contudo ao fim de poucos anos as equipas começaram a utilizá-los de modo a permitir a alteração do escoamento, quer através do desvio deste ou através da geração de vórtices de modo a retardar a separação do escoamento em torno das rodas traseiras, numa tentativa de diminuir a resistência aerodinâmica provocada por estas.

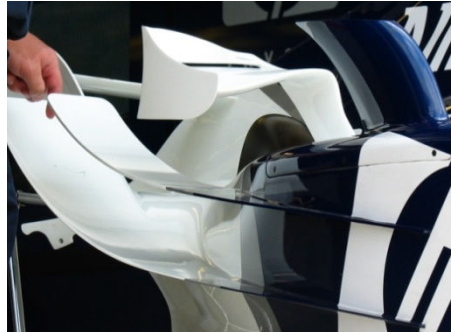


Figura 23 - "Winglets"

1.8.6.3 “Barge Boards”

Com a introdução de uma altura mínima ao solo em 1994, através da colocação de uma tábua de madeira no fundo dos carros, tábua esta que não poderia desgastar-se mais do que 1mm no decorrer da corrida, as equipas deixaram de ter ao seu dispor do benefício da diminuta altura ao solo de forma tão eficiente como vinha sendo até aí.

Assim as equipas necessitaram de criar dispositivos que permitissem controlar o caudal de ar que escoava para o fundo do carro. Assim surgem os “barge boards”, placas deflectoras que canalizam o ar em excesso no início do fundo do carro para dentro dos ductos de refrigeração.



Figura 24 - "Bargeboards"

1.8.6.4 Outros

O mundo da Fórmula 1 é um mundo onde praticamente a cada dia que passa aparecem componentes novos, uns que permanecem durante algumas corridas nos carros e outros que são descartados ao fim de pouco tempo.

Ao longo dos anos apareceram bastantes inovações e apêndices aerodinâmicas, desde tubos de escape que aumentavam o caudal para o fundo do carro, saídas de escape cujo objectivo era aumentar o caudal para a asa traseira, guelras de refrigeração criadas de modo a diminuir a resistência aerodinâmica interna e externa, cornos colocados em locais diferentes dos mencionados anteriormente entre outras inovações que caíram no esquecimento.



Figura 25 - Diferentes componentes aerodinâmicos testados na Fórmula 1

1.9 CDG-wing (Central Downwash Generating Wing)

Este conceito foi proposto pela Federação Internacional do Automóvel no dia 23 de Outubro de 2005 e consiste numa tentativa de forçar as equipas a projectarem os seus carros de uma forma que possibilite a execução de ultrapassagens, de modo a aumentar o interesse na competição por parte dos adeptos.

Desde meados dos anos 90, do século XX, que se tem vindo a verificar um aumento significativo da dependência aerodinâmica dos carros de Fórmula 1. Este fenómeno levou a um aumento da chamada tracção aerodinâmica, isto é, a tracção (atrito máximo produzido em curva) provocada pelas rodas apenas depende do “downforce” a que estas estão sujeitas, retirando assim a dependência pela tracção mecânica, tracção esta que está directamente relacionada com a geometria da suspensão do carro e com a própria dinâmica do veículo.

Assim com este aumento significativo da dependência aerodinâmica começou-se a verificar que os carros que se aproximavam da traseira de outro tinham uma grande dificuldade em curvar, devido ao seu posicionamento na esteira do carro que segue imediatamente à frente, o que leva à perda de eficiência da asa dianteira do carro e consequentemente uma diminuição da tracção nas rodas dianteiras.

Este novo conceito proposto pela Federação Internacional do Automóvel, visa diminuir a dependência aerodinâmica dos carros através da diminuição da eficiência aerodinâmica dos mesmos e ao mesmo tempo diminuir a dimensão da esteira na traseira dos carros, possibilitando a aproximação dos carros imediatamente atrás.

A diminuição da eficiência aerodinâmica em parte é conseguida através da divisão da asa traseira em 2 mais pequenas e colocando-as atrás das rodas traseiras, uma zona bastante turbulenta. Com esta alteração há uma diminuição substancial da esteira provocada na zona central do carro, visto não existir já a asa traseira naquela posição. Este facto permite que haja um escoamento menos turbulento na zona central do carro, garantindo que a zona central da asa dianteira do carro que segue atrás cria algum “downforce”, necessário para manter a tracção nos pneus dianteiros e assim permitindo que este se possa aproximar mais em curva, sem que o seu carro sofra de subviragem.

Os estudos computacionais iniciais desta proposta foram realizados pela Wirth Engineering, sendo os resultados validados pelo Engenheiro Jean-Claude Migeot no túnel de vento da Fondmetal, em Itália. Embora não tenham sido publicados os resultados obtidos, em Agosto de 2007 foi publicado um artigo escrito pelo director técnico da Wirth Engineering, o Engenheiro Nick Wirth, na revista Racecar Engineering, a explicar como surgiu esta proposta da asa bipartida.

O conceito surgiu através da análise de outras competições automóveis nas quais se verificam a utilização de asas para aumentar a tracção dos pneus, mas sem perturbar a capacidade de um carro se aproximar de outro em curva. Após o estudo inicial conclui-se que as corridas da Indy Racing League (IRL) que decorrem em circuitos ovais são provas nas quais os carros que embora dependentes da aerodinâmica esta dependência não limita a capacidade de rodar próximos do carro da frente. Após esta verificação iniciou-se um estudo do comportamento do escoamento em torno dos carros e o que levaria a que estes carros não perdessem eficiência aerodinâmica.

Assim numa tentativa de diminuir a dependência em curva dos carros a equipa decidiu criar um carro de Fórmula 1 que conseguisse garantir um escoamento idêntico ao verificado nos carros de IRL. Neste estudo inicial verificou-se uma diminuição do “downforce” do carro dianteiro e uma menor perda de “downforce” no eixo dianteiro do carro que segue atrás, contudo não foram publicados dados referentes a estas conclusões.

Assim a 23 de Outubro de 2005 a Federação Internacional do Automóvel apresenta o conceito CDG-wing, enviando para a imprensa apenas desenhos que mostram como os novos carros poderão parecer e uma imagem da distribuição total de pressão em torno de um carro actual com um carro com o conceito CDG.

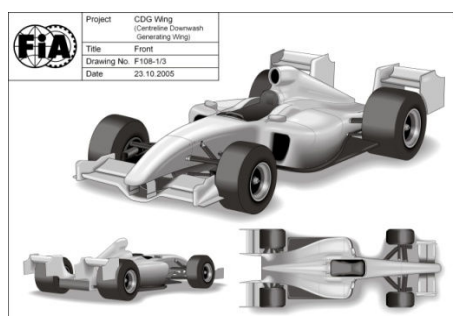


Figura 26 - Carro do conceito CDG

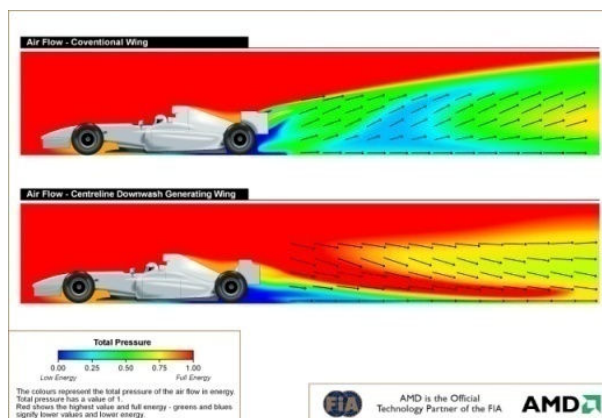


Figura 27 - Distribuição de pressão total num carro convencional e num carro CDG

Contudo devido à falta de informação sobre este conceito e sobre a execução do estudo conceptual, a ideia foi satirizada em toda a imprensa.

Em Junho de 2007 o Sr. Miqdad Ali em parceria com o Engenheiro Simon Mcbeath publicam um artigo onde exploram a validade da informação apresentada pela FIA, em Outubro de 2005. No estudo levado a cabo concluíram que a perda de eficiência na asa dianteira passa de 43% para 27,5%, sem uma significativa alteração na asa traseira do carro que segue atrás. Contudo este estudo não foi considerado válido devido a alguns erros na elaboração do mesmo, como é o caso da utilização de carros no estudo que não respeitam o regulamento proposto, na totalidade. Embora a imagem que se segue evidencia um resultado próximo do apresentado pela Federação Internacional do Automóvel.

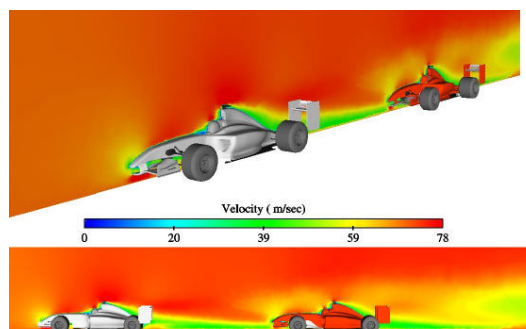


Figura 28 - Resultado do estudo de Ali e Mcbeath

Devido ao secretismo entre as equipas que estão já a estudar estas novas regras não foram obtidos até à altura nenhuns resultados que possam servir de base para este projecto, embora das 3 equipas contactadas todas tenham garantido que já estariam a estudar e a desenvolver carros para estas novas regras, mesmo 18 meses antes das alterações chegarem à pista.

Resultados

2.1 Introdução

Para a realização deste trabalho optou-se por tentar utilizar um procedimento próximo do procedimento de projecto utilizado pelas equipas de Fórmula 1. Assim, foi necessário analisar os métodos utilizados pelas equipas e estudar as possibilidades da realização do trabalho.

O desenvolvimento de um componente poderá ser feito de três métodos diferentes.

Existes três métodos são:

- Experimental
- Computacional
- Experimental e Computacional

O primeiro método consistia na construção de um modelo para ser testado no túnel de vento. Contudo esta solução na altura pareceu ser pouco viável devido aos seguintes factores:

- Inexistência de equipamento disponível para testar carros. Devido à necessidade de uma passadeira rolante que simulasse a estrada e devido à necessidade de construir este equipamento e efectuar a sua calibração.
- Eventuais defeitos de fabrico do modelo que levariam à falta de validade dos resultados obtidos.

Devido a estes factores a 1ª opção foi abandonada e consequentemente a 3ª também o foi, visto que, implicaria a realização da 1ª opção e comparação dos resultados obtidos nesta com os resultados obtidos no trabalho computacional.

A 2ª opção pareceu ser a mais viável, embora fosse necessário passar por um processo de aprendizagem do software que viria a ser escolhido e também a aquisição da licença de utilização do software, pareceu ser a solução mais viável.

Nesta fase foi necessário escolher entre desenvolver um software ou adquirir um software já existente e validado. Contudo devido à complexidade do projecto verificou-se que não seria viável a criação de um código devido às limitações de tempo. Assim foi necessário procurar no mercado um software que fosse ao mesmo tempo acessível e simples de trabalhar.

Embora existentes no mercado bastantes softwares acessíveis ao público, tais como:

- Star cd
- Fluent
- APUS
- FloWizard

Optou-se pela utilização de um recém-criado software chamado: “Fluent for Catia”.

Este código consiste num módulo que poderá ser acrescentado ao software de CAD, CATIA, de modo a possibilitar a análise computacional de fluidos num ambiente familiar para o utilizador de CATIA, sem ser necessário aprender linguagens de programação nem saber detalhadamente conceitos de mecânica computacional para realizar os testes.

A execução dos cálculos associados à resolução dos problemas é feita recorrendo ao código do Fluent 6.3.

2.2 Design dos componentes

O design dos componentes foi feito recorrendo ao software CATIA V5 R16, por razões de familiaridade e de disponibilidade do mesmo no Departamento de Ciências Aeroespaciais, da Universidade da Beira Interior.

A selecção da geometria dos componentes foi feita através da análise do regulamento técnico publicado pela Federação Internacional do Automóvel para os carros que deverão ter incorporar o conceito CDG no seu design.

Inicialmente estava previsto o design completo do carro de modo a se poder estudar a influência da proposta no comportamento aerodinâmico global do carro, contudo devido à limitação dos meios computacionais foi necessário reduzir a complexidade do trabalho e passou a ser apenas necessário o design dos componentes que têm uma influencia directa no escoamento para a asa traseira, componentes estes que já se encontravam prontos visto que o design do carro completo já estava algo adiantado. Assim optou-se apenas por utilizar o conjunto roda traseira e jante, sendo também colocado uma conduta de refrigeração para o travão traseiro, não estando o disco e pinça de travagem presentes de modo a simplificar o modelo em estudo.

Segundo o artigo 3.10 do regulamento técnico proposto apenas poderão existir componentes da carroçaria no espaço compreendido entre 515 e 1000 mm do eixo central longitudinal do carro, entre 250 e 700 mm atrás do eixo das rodas traseiras e mais de 360 mm acima do plano de referência, sendo este plano de referência o plano mais baixo do carro, excluindo as rodas e suspensão.

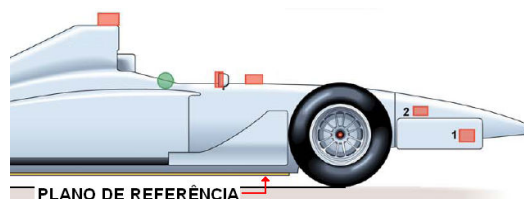


Figura 29 - Plano de referência

Tendo as asas ainda uma limitação adicional pois estas apenas poderão se encontrar num espaço que deverá estar pelos menos 740 mm acima do plano de referência, e a mais de 315 mm do eixo das rodas traseiras. Por fim, a extremidade mais atrás não deverão estar a menos de 695 mm atrás do eixo das rodas traseiras ou 965 mm acima do plano de referência.

Tendo em conta todas as limitações impostas pelo regulamento foi feito um desenho que limita as dimensões regulamentares. Com esta “geometria regulamentar” é possível verificar se as asas desenhadas estão contidas em dentro da geometria, tornando-as assim legais face ao regulamento.

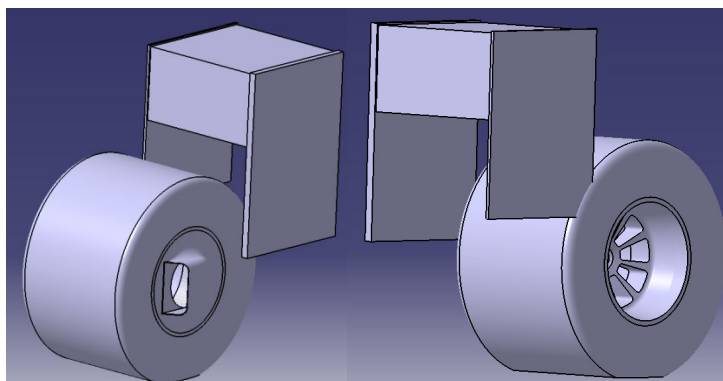


Figura 30 - Geometria regulamentar

A selecção do perfil alar a ser utilizado na asa recaiu num perfil Benzing. Estes perfis foram criados pelo engenheiro Enrico Benzing, quando este trabalhou na Fórmula 1 e durante longos anos foram considerados como os perfis referência para a Fórmula 1 e outras competições automóveis.

De modo a evitar o trabalho moroso de dimensionar a fenda entre a asa e o “flap”, foi escolhido um conjunto asa/“flap” cujas coordenadas já estavam tabeladas. Assim escolheu-se o perfil Be 112-205, para a asa e o perfil Be 152-155 para o “flap”, sendo as coordenadas dos elementos as seguintes:

Tabela 1 - Coordenadas do perfil da asa e do “flap” em função da corda

% da corda	Be 112-205		Be 152-155	
	Intradorso	Extradorso	Intradorso	Extradorso
0	2.46	2.46	5.97	5.97
1,25	0.45	5.68	2.66	8.78
2,5	0.08	7.19	1.63	10.05
5	0.19	9.48	0.59	11.76
7,5	0.75	11.32	0.13	12.96

10	1.54	12.88	0	13.89
15	3.46	15.45	0.25	15.22
20	5.58	17.46	0.94	16.03
30	9.65	20.14	2.87	16.67
40	12.79	21.29	4.8	16.29
50	14.56	21.03	6.2	15.09
60	15.81	19.43	6.77	13.2
70	16.42	16.42	6.4	10.7
80			5.06	7.64
90			2.83	4.02
95			1.42	1.99
100			0	0

As coordenadas da asa e do “flap” foram obtidas na Referência xx, não existindo mais pontos para o perfil da asa, pois as coordenadas desta apenas aparecem já num conjunto asa/“flap” na qual a asa representa 70% da corda do conjunto.

De modo a ter-se a possibilidade de comparar resultados em diferentes asas, nas condições propostas, optou-se pelo desenho de 3 modelos de asa, a Mk1, a Mk2 e a Mk3, sendo a única diferença entre elas o ângulo de ataque do “flap”. Assim ficou-se com a seguinte configuração para o conjunto asa/“flap”:

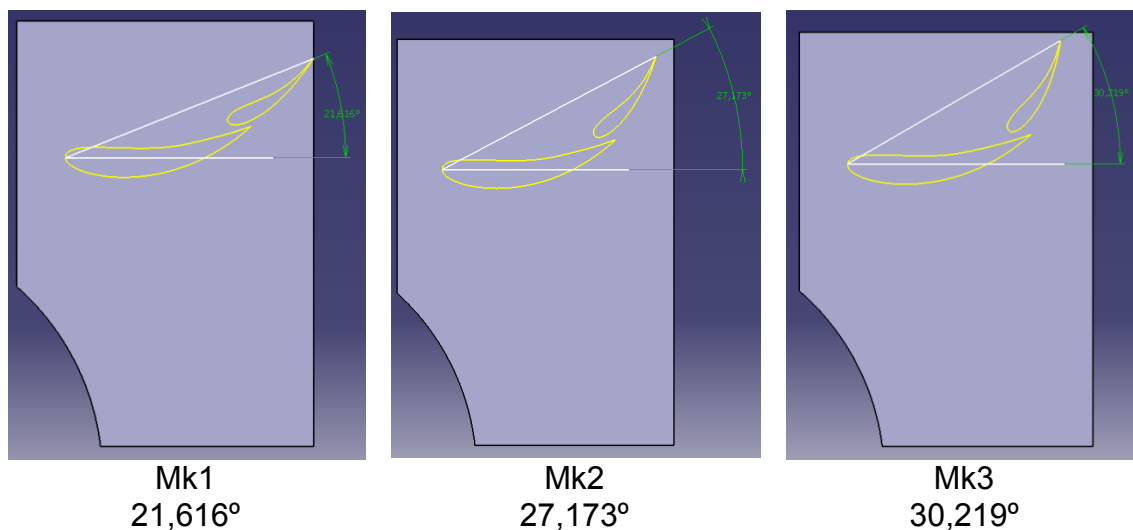


Figura 31 - 3 modelos de asa e os ângulos de ataque do conjunto

De modo a que mais tarde se pudesse calcular o coeficiente de sustentação e o coeficiente de resistência aerodinâmica, foi necessário calcular a área de referência das asas, assim foram calculadas duas áreas de referência.

Para o cálculo do coeficiente de sustentação utilizou-se como área de referência a área da projecção vertical da asa, isto é, a área ocupada pela asa quando vista de cima. Contudo, neste caso desprezou-se a área dos “endplates” visto que são elementos que não contribuem directamente para a geração de “downforce”, pois a sua função consiste em evitar a perda de eficiência verificada na ponta das asas. Embora os endplates produzam

alterações no escoamento que poderão gerar algum “downforce” ou sustentação, contudo, este valor é bastante baixo comparativamente com o valor criado pelo conjunto asa/flap. Assim optou-se por apenas efectuar os cálculos da área dos componentes que produzem praticamente a totalidade do “downforce”.

Para o cálculo do coeficiente de resistência aerodinâmica utilizou-se como área de referência a área da projecção longitudinal da asa, isto é, a área ocupa pela asa quando vista de frente. Neste caso já se teve em consideração todos os elementos, visto que todos os elementos produzem resistência aerodinâmica.

Assim ficou-se com as seguintes áreas:

Asa	Coeficiente de sustentação	Coeficiente de resistência aerodinâmica
Mk1	0,169083	0,100454
Mk2	0,156294	0,113778
Mk3	0,147114	0,120015

2.3 Ensaios em CFD

2.3.1 Validação da metodologia computacional

De modo a que possa considerar os resultados apresentados neste trabalho como válidos e de modo a que outros possam analisar o trabalho desenvolvido foi necessário realizar um estudo de modo a comparar um resultado computacional a um resultado experimental.

Assim optou-se pela realização de um estudo do escoamento em torno de um cilindro bidimensional e a comparação do resultado obtido com os resultados tabelados do coeficiente de resistência aerodinâmica em função do número de Reynolds.

Após o desenho do cilindro foi necessário a escolha das condições de fronteira e selecção da área do volume de controlo. O cilindro desenhado ficou com 490mm de comprimento e 200mm de diâmetro, ficando com as suas pontas encostadas à parede do volume de controlo de modo a que o escoamento a ser analisado e os resultados obtidos fossem o mais próximo possível dos obtidos experimentalmente, para cilindros bidimensionais.

Assim foi obtido um valor para a resistência aerodinâmica de 35,154N, para um escoamento de 25 m/s.

Através da equação:

$$C_D = \frac{D}{0,5 \times S \times \rho \times V^2}$$

Onde D é o valor para a resistência aerodinâmica, S é a área de projecção do cilindro, ρ a massa volúmica do fluido, neste caso ar, e V a velocidade do escoamento não perturbado. Daí retirou-se o coeficiente de resistência aerodinâmica do cilindro analisado computacionalmente, obtendo o valor de: 0,9375.

De modo a que se possa comparar este resultado com os valores tabelados é necessário calcular o número de Reynolds deste cilindro, através da fórmula:

$$Re = \frac{V \times \rho \times L}{\mu}$$

Onde V é a velocidade do escoamento não perturbado, ρ a massa volúmica do fluido, neste caso ar, L o comprimento característico que no nosso caso é igual ao diâmetro do cilindro e μ a viscosidade do fluido, neste caso ar. Obtendo-se um valor para o número de Reynolds de 3,40E+05.

Com este resultado recorreu-se a uma tabela do coeficiente de resistência aerodinâmica de um cilindro bidimensional em função do número de Reynolds e retirou-se um valor aproximado de 0,95, o que é um valor bastante próximo do valor obtido computacionalmente, validando assim os resultados obtidos pelo software utilizado.

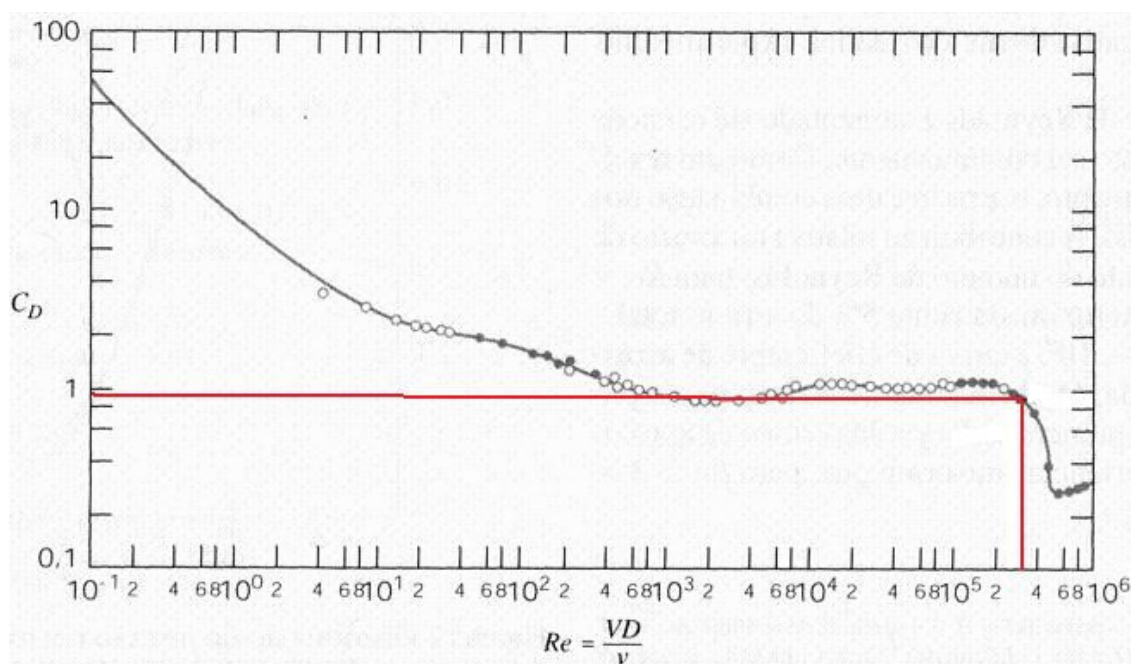


Gráfico 1 - Coeficiente de resistência de um cilindro bidimensional em função de Reynolds

Como podemos verificar através da análise do Gráfico 1, o resultado obtido no ensaio computacional, de 0,9375, ficou bastante próximo do valor tabelado, contudo devido à falta de resolução do gráfico não se consegue retirar com precisão.

Um facto de realçar é o facto de durante a preparação do ensaio com o cilindro não foi considerado, por esquecimento, o efeito de bloqueio causado pela limitação da área da secção de testes, este fenómeno é causado pela limitação da área da secção de teste que, devido ao seu reduzido tamanho provoca a aceleração indesejada do escoamento em torno do componente em estudo, obtendo-se assim resultados incorrectos. Contudo, ao analisar-se as imagens obtidas da análise do escoamento em torno do cilindro conclui-se que não existia qualquer alteração do escoamento nas zonas junto às paredes do volume de controlo. Esta análise foi feita recorrendo à observação da intensidade e orientação dos vectores de velocidade em torno do cilindro.

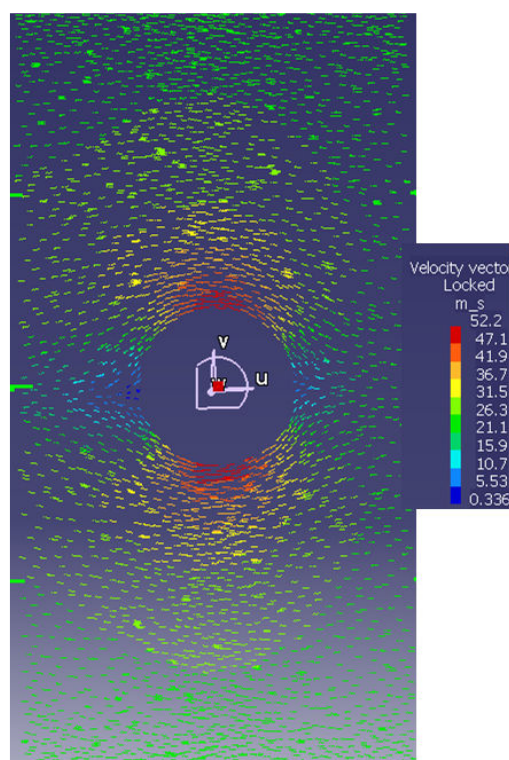


Figura 32 - Escoamento em torno do cilindro

Como podemos ver na figura a orientação dos vectores da velocidade mais próximos da periferia superior e inferior mantém sempre a sua orientação, sem que sofram alterações na direcção ou intensidade, o que indica a manutenção da velocidade do escoamento nesta zona e que o escoamento não sofre alterações. Também se verifica que existe uma simetria entre a parte inferior e superior, tal como seria de esperar num cilindro sem rotação num escoamento.

2.3.2 Selecção das velocidades de ensaio

Para além de se pretender testar 3 conjuntos de asa ficou decidido efectuar o teste de cada asa a 3 velocidades diferentes.

Assim de modo a seleccionar as velocidades do escoamento foi necessário definir um processo para a selecção. Optando-se pela selecção de 3 curvas em

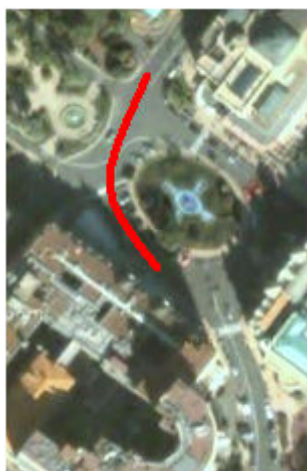
pistas do mundial de Fórmula 1, cujo “downforce” tem um papel importante para a realização da curva o mais depressa possível.

Assim, optou-se por 3 curvas:

Curva do Casino – circuito do Mónaco, no Mónaco;

Curva New Holland – circuito de Barcelona, em Espanha;

Curva 130R – circuito de Suzuka, no Japão.



Curva do Casino



Curva New Holland



Curva 130R

Figura 33 - Vista aérea das curvas seleccionadas

A selecção da curva do Casino, no Mónaco, deveu-se ao facto desta curva ser uma curva bastante interessante por ter uma zona de travagem ainda durante a curva que a precede imediatamente, que leva a alguma instabilidade durante a entrada na Curva do Casino. Para além desta particularidade esta curva tem o “relevé” para fora da curva e uma elevada rugosidade do asfalto.

A escolha das curvas New Holland e da 130R deveram-se ao facto de serem curvas bastante rápidas e com a particularidade do asfalto ser bastante rugoso o que poderá tornar complicada a execução da curva. No caso da curva New Holland esta não é totalmente efectuada a fundo mas sim com um ligeiro aliviar do acelerador. No caso da curva 130R trata-se de uma das poucas curvas de todo o mundial de Fórmula 1 que os carros conseguem descrever praticamente à velocidade máxima sem que seja necessário efectuar uma travagem ou se tenha que tirar o pé do acelerador e deixar o carro abrandar um pouco. Contudo embora a vista aérea faça parecer que se trata duma curva relativamente simples na realidade os seus 130 metros de raio do arco da curva faz com que esta se torne bastante apertada quando descrita a mais de 300 km/h.

Após a selecção das curvas passou-se à definição das velocidades dos escoamentos que foi, possivelmente, a parte mais interessante de todo este trabalho. Devido à falta de informação exacta das equipas, optou-se por utilizar um simulador de Fórmula 1 de modo a verificar as velocidades praticadas nas curvas seleccionadas.

O simulador utilizado foi o “F1 Challenge 99-01” da EA Sports, com o módulo de 2005 instalado. O processo consistiu em efectuar 50 voltas a cada um dos traçados escolhidos e retirar os tempos e velocidades quer de um piloto “virtual” que do carro pilotado pelo autor do presente trabalho e comparar esses tempos com os tempos realizados em 2005 pelos pilotos dos carros utilizados no simulador.



Figura 34 - Vista do simulador "F1 Challenge 99-02"

Assim obtiveram-se os seguintes valores:

	Monaco	Bacelona	Suzuka
Tempo Piloto Virtual 1	1:19.778	1:19.911	1:37.927
Tempo Piloto Real 1	1:19.034	1:18.998	1:35.388
Tempo Piloto Virtual 2	1:16.534	1:17.642	1:34.173
Tempo Piloto Real 2	1:15.835	1:16.614	1:31.540
Velocidade em curva Virtual [km/h]	125	217	295

Através dos tempos obtidos verifica-se que estes são próximos e mais altos do que os tempos obtidos no mundial de 2005, pelos pilotos “reais”. Concluiu-se assim, que as velocidades verificadas no simulador serão velocidades possíveis nas curvas analisadas.

As velocidades escolhidas para cada curva são:

Circuito	Monaco	Barcelona	Suzuka
Velocidade	125	217	295

2.3.3 Volume de controlo, malha e condições de fronteira

De modo a efectuar a efectuar os ensaios foi necessário fazer uma preparação prévia do problema. Esta preparação consistiu na geração e definição da malha, definição das condições de fronteira e do volume de controlo.

Inicialmente as dimensões do volume de controlo foram um pouco arbitrárias. Contudo, nesta fase inicial, começou-se a ter a assistência de um elemento da Ansys/Fluent que foi aconselhando e detectando alguns erros no trabalho, que na maioria dos casos se deveram a falta de experiência, embora numa fase mais avançada do trabalho começaram a sugerir alguns erros de programação por parte da própria Ansys.

Com esta ajuda e com base num contacto da indústria automóvel, foi sugerido uma dimensão para o volume de controlo, ficando este com as seguintes dimensões:

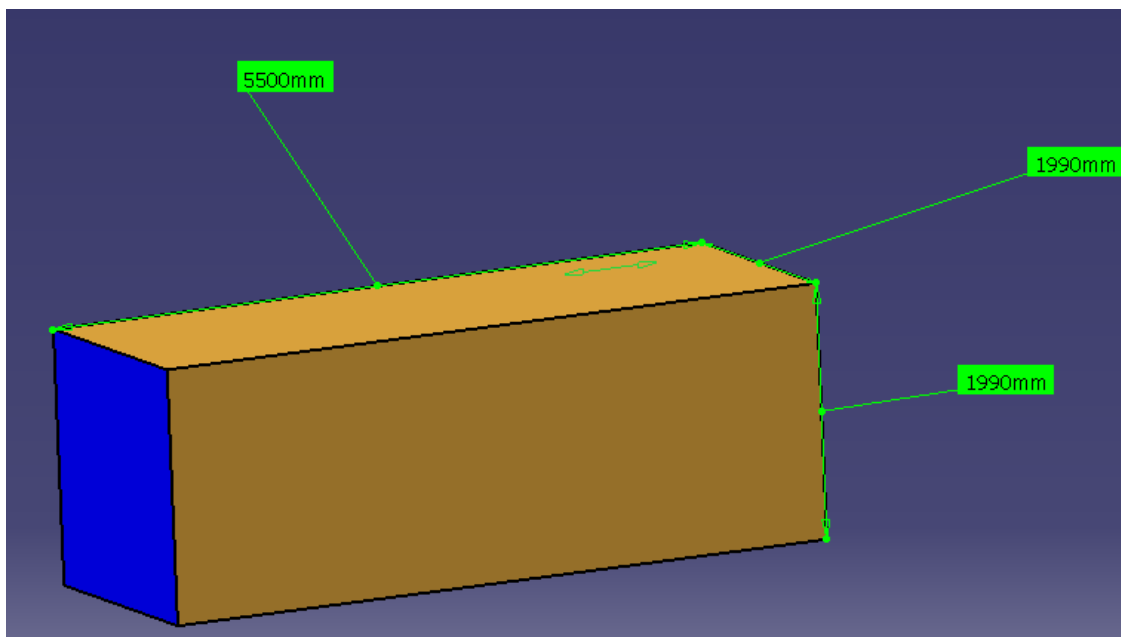


Figura 35 - Dimensões do volume de controlo

No que toca à malha este foi talvez o processo que levou mais tempo a otimizar, devido à complexidade dos componentes usados, à dimensão do volume de controlo e por fim devido às limitações apresentadas por parte do computador utilizado, que apenas dispunha de 3,25Gb de memória RAM para a execução dos cálculos.

Assim, optou-se pela utilização de uma malha que permitisse o melhor resultado possível dentro das nossas limitações, o que levou à selecção de uma malha um pouco mais refinada no conjunto da asa e bordo de fuga desta, de modo a obter os resultados mais precisos possíveis para o conjunto asa. E uma malha um pouco menos refinada para o conjunto roda/jante de modo a possibilitar a obtenção de um escoamento parecido com o escoamento real em torno da roda. Por fim, os restantes elementos da malha ficaram com uma malha mais grosseira, de modo a diminuir as necessidades computacionais.

Outra situação que trouxe alguns problemas foi a colocação da roda em movimento, de modo a recriar com alguma precisão o escoamento em torno desta. Para que este efeito fosse possível tornou-se necessário criar um subdomínio, que envolveria a roda, dentro do volume de controlo o qual se

colocaria em rotação à velocidade de modo a que recriasse uma velocidade linear do carro igual à velocidade do escoamento.

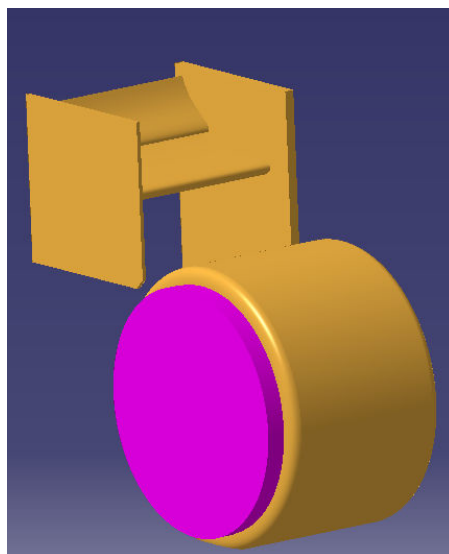


Figura 36 – Subdomínio da malha utilizado para a rotação

De modo a que fosse calculada a velocidade de rotação da roda foi necessário recorrer à seguinte equação:

$$\frac{v \times 10^3}{60} = \omega \times r \Rightarrow \omega = \frac{v \times 10^3}{60r} \text{ [rpm]}$$

Nesta equação obtemos o número de rotações da roda (ω) em rotações por minuto [rpm] da roda, a partir da velocidade linear (v) em metros por segundo e do raio da roda (r) de 0,3545 m. Assim ficou-se com os seguintes valores:

Tabela 2 - Velocidade de rotação da roda

V [km/h]	RPM
125	5880
217	10202,2
295	13869,3

Embora esta preparação tenha sido um processo bastante moroso devido à falta de experiência nas técnicas de geração de malhas. Contudo, após a definição dos parâmetros da malha de todas as peças este trabalho deixou de ser necessário, visto que, em todos os ensaios realizados utilizou-se sempre a mesma malha.

No que toca às condições de fronteira o software utilizado mostrou ser fácil de usar, visto que indicava os passos que estávamos a fazer. Após a definição do volume de controlo era necessário seleccionar cada uma das paredes e definir qual o parâmetro em questão para essa parede.

Na fronteira de entrada no volume de controlo, que podemos identificar como a seta verde com o V definiu-se que esta entrada ser a velocidade de entrada no

volume de controlo, sendo esta velocidade igual às velocidades seleccionadas para os ensaios.

Na fronteira de saída do volume de controlo, que podemos identificar como sendo a seta vermelha com o P , definiu-se como sendo a pressão atmosférica, de modo a evitar que diferenças de pressão entre o interior e o exterior do volume de controlo pudessem influenciar o escoamento dentro deste.

Embora não visível na imagem nas restantes paredes definiu-se estas como paredes móveis que têm uma velocidade igual à velocidade de entrada do escoamento no volume de controlo para evitar o aparecimento duma camada limite que não existe na situação real.

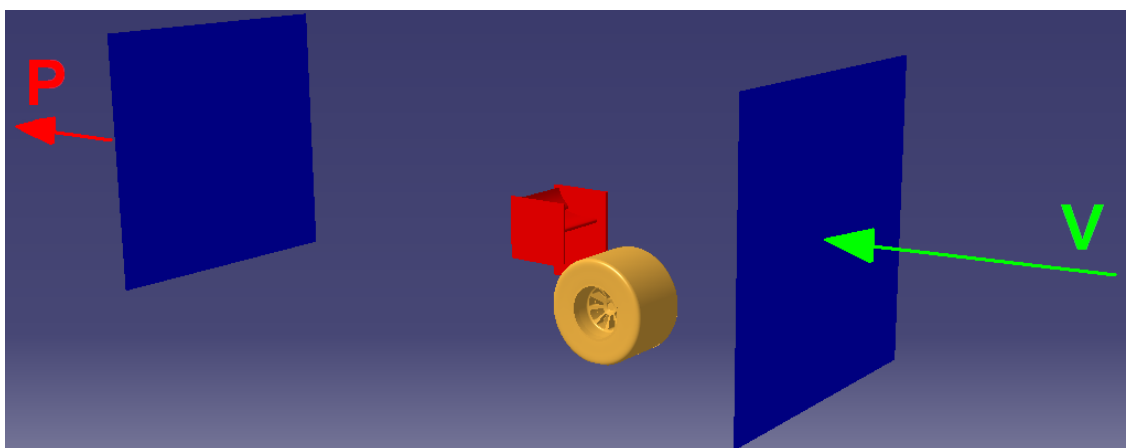


Figura 37 - Conjunto Asa/roda dentro do volume de controlo

2.3.4 Critério de Convergência

O critério de convergência define a paragem do processo iterativo, quando se atingiu um resultado que satisfaça resíduos mínimos nas diversas equações. Com a paragem o software gera um ficheiro com os resultados e com toda a informação necessária para efectuar o pós-processamento.

Para a primeira fase de simulações o autor optou pela utilização do critério de convergência que vem por defeito no software, no qual vem definido que os resíduos das três componentes da velocidade ao atingirem 1×10^{-5} é atingida a convergência.

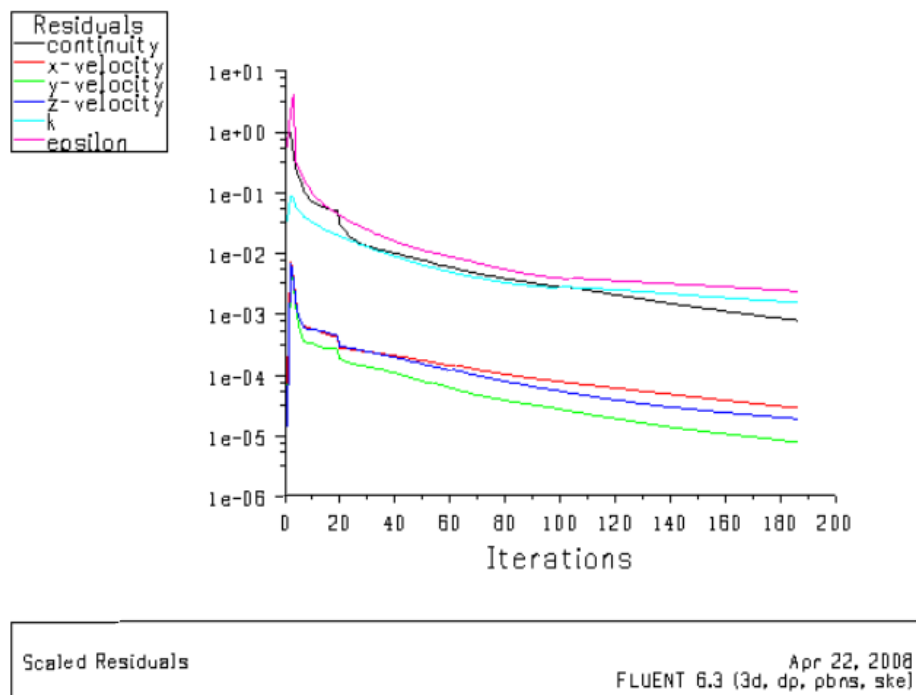
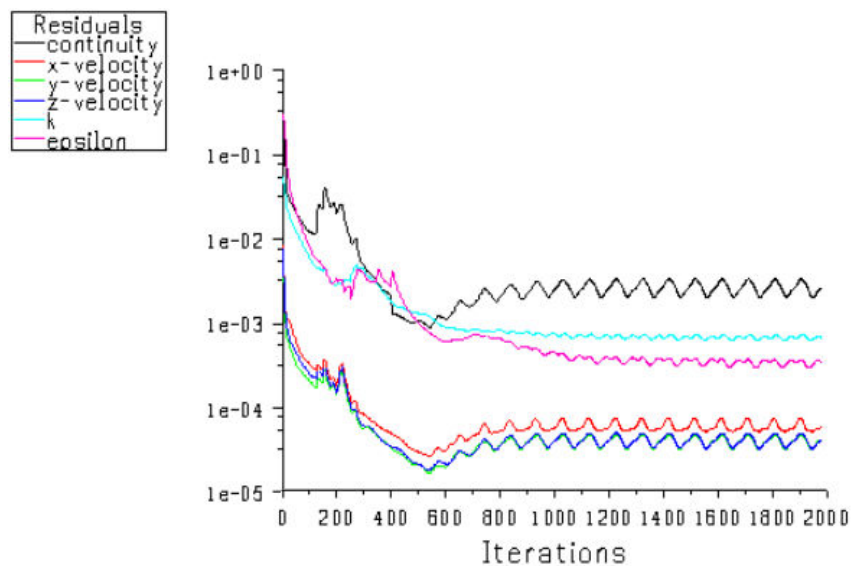


Gráfico 2 - Resíduos para uma simulação da primeira fase

Contudo, ao se iniciar a segunda fase dos ensaios, verificou-se que ao fim de 12 dias ainda não tinha atingido o critério de convergência, que vem definido inicialmente no software.

Assim, ao investigarmos as razões pelas quais isto se estaria a verificar apercebemo-nos que os resíduos entraram num regime oscilatório. Ao fim de cerca de 800 iterações os resultados do sistema de equações de uma equação induzia resultados obtidos anteriormente para as outras equações e os resultados repetiam-se ciclicamente. Esta situação pode estar associada a problemas de erros de “round-off” que ultrapassam os valores mínimos suportados por uma máquina de 32 bits ou poderão ser motivados pelas condições de fronteira livres. Note-se que estas oscilações são de origem numérica uma vez que o programa de cálculo usa uma formulação de médias de Reynolds com a qual o termo transitório é nulo.



Scaled Residuals

Apr 17, 2008
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, rke)

Gráfico 3 - Regime oscilatório verificado no início da segunda fase

Assim, com base nos valores dos resíduos escolheu-se um novo critério de convergência, correspondente ao início da fase oscilatória.

Ensaio e Resultados

3.1 1ª Fase

Nesta primeira fase pretendeu-se avaliar quer a eficiência quer o desempenho das asas desenhadas num escoamento não perturbado, de modo a que se pudesse comparar a variação do comportamento da asa quando colocada dentro da esteira da roda.

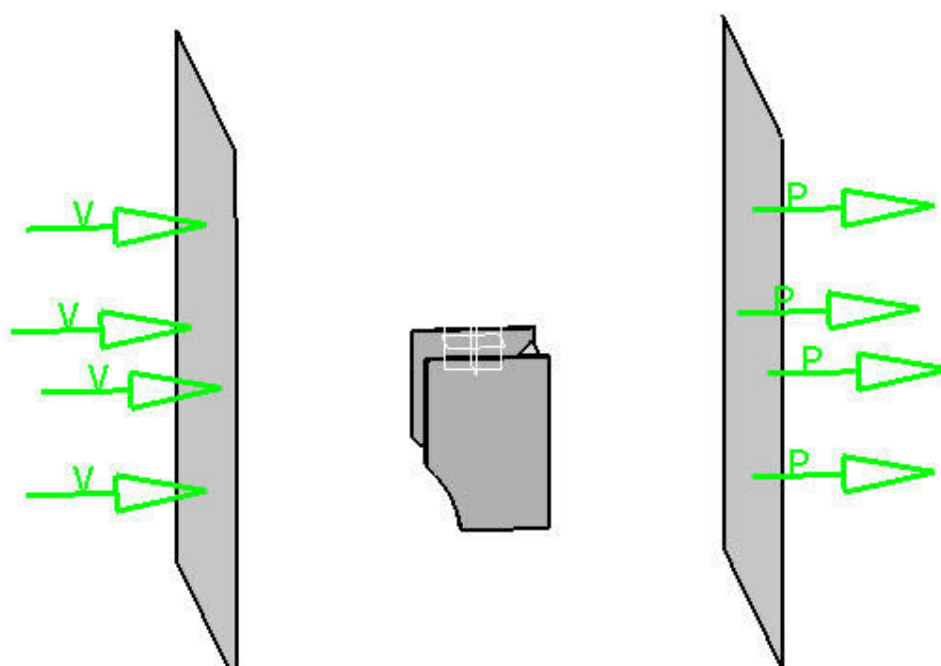


Figura 38 - Asa sem conjunto roda/jante no volume de controlo

Assim obteve-se os seguintes valores, em Newton, para os três modelos de asa estudados:

Asa Mk1

	"Downforce"	Resistência Aerodinâmica	Eficiência
125 km/h	264,207	105,202	1,492064555
217 km/h	282,184	120,046	1,711199643
295 km/h	296,213	147,944	1,633383949

Asa Mk2

	"Downforce"	Resistência Aerodinâmica	Eficiência
--	-------------	--------------------------	------------

125 km/h	797,775	316,436	1,497827591
217 km/h	844,367	359,918	1,707826209
295 km/h	891,846	445,393	1,633533356

Asa Mk3

	“Downforce”	Resistência Aerodinâmica	Eficiência
125 km/h	1476,177	584,283	1,501006157
217 km/h	1568,034	665,206	1,71599219
295 km/h	1646,217	822,566	1,632667897

3.2 2ª Fase

Nesta segunda fase pretendeu-se avaliar que a eficiência, quer o desempenho das asas colocadas na sua posição atrás das rodas.

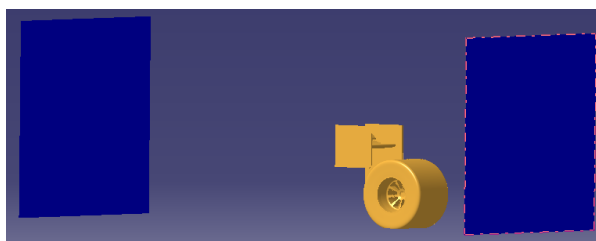


Figura 39 - Asa e conjunto roda/jante dentro do volume de controlo

Assim obteve-se os seguintes valores, em Newton, para os três modelos de asa estudados:

Asa Mk1

	“Downforce”	Resistência Aerodinâmica	Eficiência
125 km/h	361,163	43,514	4,931074163
217 km/h	1122,653	134,554	4,956969174
295 km/h	2054,666	258,141	4,728806422

Asa Mk2

	“Downforce”	Resistência Aerodinâmica	Eficiência
125 km/h	402,781	122,598	2,391671783
217 km/h	1187,941	359,146	2,407907653
295 km/h	2174,991	641,077	2,469808367

Asa Mk3

	“Downforce”	Resistência	Eficiência
--	-------------	-------------	------------

		Aerodinâmica	
125 km/h	411,411	129,867	2,58439336
217 km/h	1238,365	402,813	2,507995289
295 km/h	2301,011	719,407	2,609309293

3.3 Análise de Resultados.

- Asas em escoamento livre não perturbado

A analisarmos os resultados obtidos é visível que os valores de sustentação e resistência aerodinâmica para a mesma velocidade aumentam com o aumento do ângulo de ataque da asa, tal como seria de esperar.

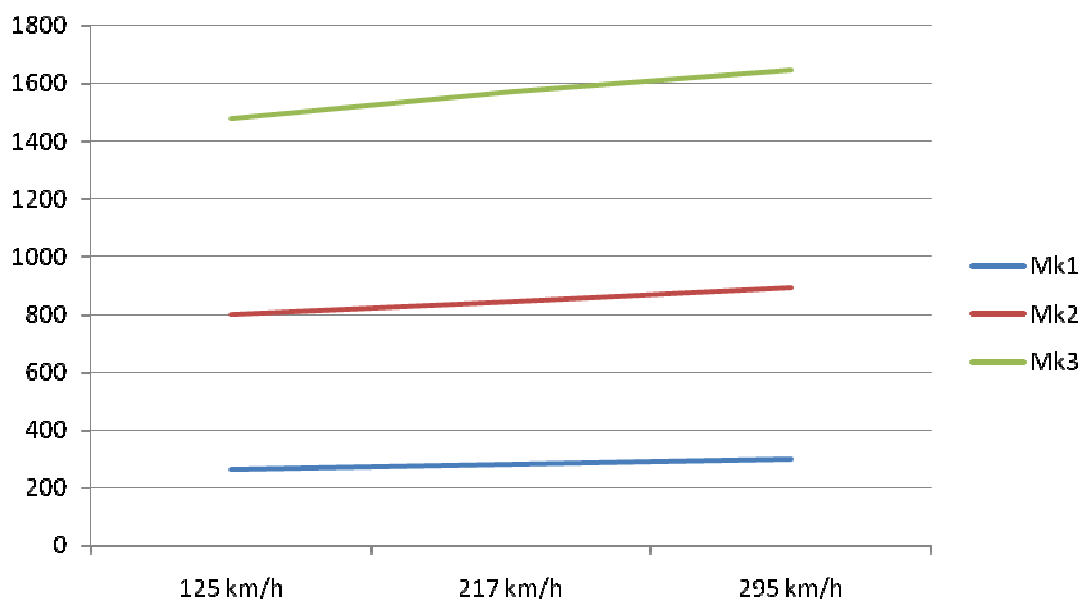


Gráfico 4 - Variação do "downforce" com a velocidade

Também visível através da análise dos resultados é o facto de para velocidades mais altas a eficiência das três asas diminui. A eficiência aerodinâmica consiste na razão entre o coeficiente de sustentação e coeficiente de resistência aerodinâmica.

$$\eta = \frac{C_L}{C_D}$$

E com base neste valor podemos analisar de uma forma qualitativa o desempenho aerodinâmico de determinado componente. Sabendo se este estará a produzir maior quantidade de sustentação ou de resistência aerodinâmica para as condições de teste.

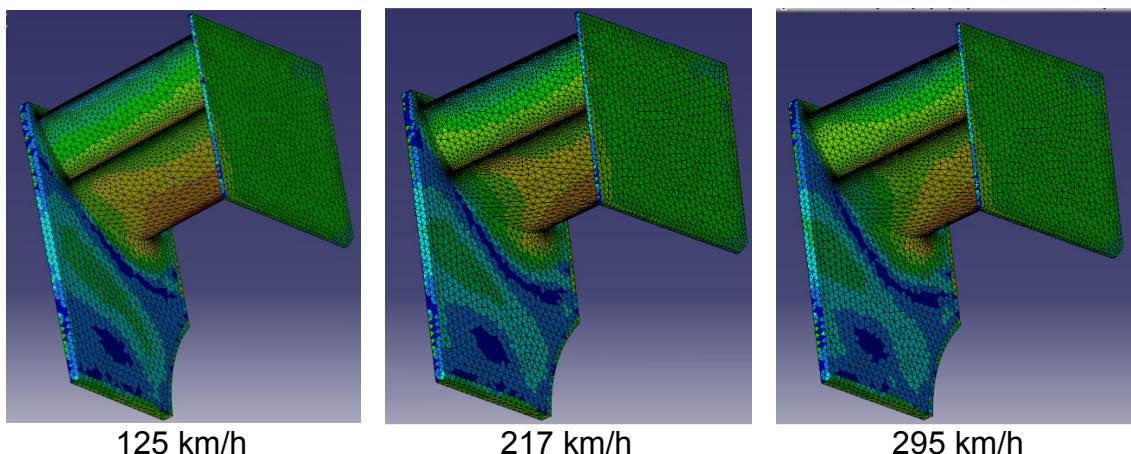


Figura 40 – Velocidade do escoamento na periferia da asa Mk2, a diferentes velocidades

Embora pouco perceptível pelas imagens existem algumas pequenas diferenças na velocidade do escoamento na periferia da asa Mk2, a diferentes velocidades de escoamento não perturbado. Estas pequenas alterações no escoamento devem-se a efeitos viscosos na asa que levam a alterações às velocidades ao longo da asa e consequentemente a alterações no desempenho das asas. Como podemos verificar na imagem a velocidade do escoamento ao longo do elemento principal da asa tem um abaixamento na velocidade do escoamento à medida que nos aproximamos do bordo de fuga, deste elemento da asa. Este fenómeno é identificável pela variação da escala de cores ao longo da asa, a cor laranja representa-nos a velocidade mais elevada que podemos verificar nestas imagens, sendo o amarelo uma velocidade um pouco mais baixa e o verde clara ainda mais baixa. Os pontos azul escuros tratam-se das zonas onde a velocidade é mais lenta.

Assim podemos concluir que à medida que a velocidade do escoamento não perturbado aumenta a separação do escoamento da asa vai aumentando, o que leva a uma diminuição do desempenho da asa.

Outra conclusão que tiramos da observação das imagens trata-se de um desempenho similar do flap em todas as asas, visto que a distribuição de velocidade é bastante similar.

Estas pequenas alterações foram verificadas em todas as asas estudadas.

- Asa colocada atrás das rodas

Embora desde o início deste trabalho se tenha pensado que haveria uma diminuição no valor do “downforce” da asa, devido à sua colocação dentro da esteira do pneu, tal facto não se verificou. Esta diminuição esperada deveu-se ao facto do escoamento dentro da esteira ser um escoamento aleatório o que levaria a que a velocidade relativa do escoamento em relação à asa fosse bastante mais baixo, logo produzindo menos “downforce” do que no escoamento livre não perturbado.

Assim tornou-se necessário analisar o comportamento do escoamento de modo a compreender o porquê desta melhoria, contrária ao esperado.

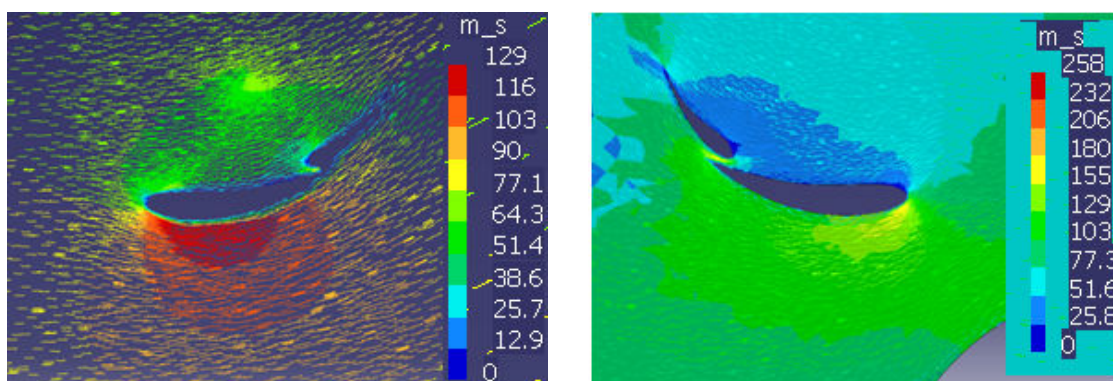


Figura 41 - Comparação do escoamento na Asa Mk2 sem roda e com roda, a 295 km/h

Através da análise das imagens obtidas verificou-se que a velocidade no extradorso da asa colocada atrás da roda é próxima na sua maioria à velocidade na extradorso da asa no escoamento livre não perturbado, com uma velocidade do escoamento na ordem dos 129 m/s. Contudo existem duas regiões na asa colocada atrás da roda com velocidades do escoamento bastante superiores às velocidades na asa em escoamento livre não perturbado.

A primeira região é próxima do bordo de ataque da asa e tem uma velocidade no escoamento na ordem dos 155 m/s, para a asa colocada atrás da roda, enquanto na outra asa tem uma velocidade entre os 77,1 e os 103 m/s. Esta diferença leva a que na zona do bordo de ataque haja maior sustentação na asa colocada atrás da roda do que na roda no escoamento livre não perturbado.

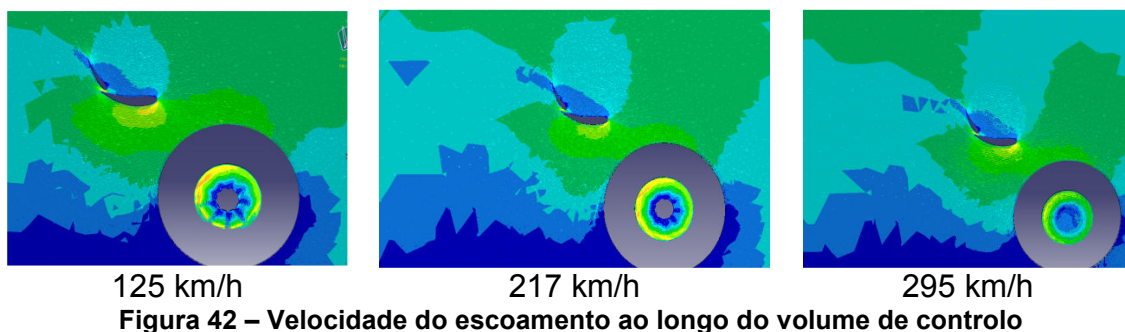
A segunda região encontra-se próxima do bordo de fuga da asa. Enquanto na asa colocada atrás da roda o escoamento no extradorso mantenha uma velocidade próxima dos 103 m/s, no caso da asa em escoamento livre não perturbado a velocidade começa a cair para valores próximos dos 90 m/s, o que faz com que a asa colocada atrás da roda também produza maior sustentação nesta área da asa.

Embora apenas apresentado um modelo de asa, verificou-se o mesmo comportamento nas restantes asas estudadas.

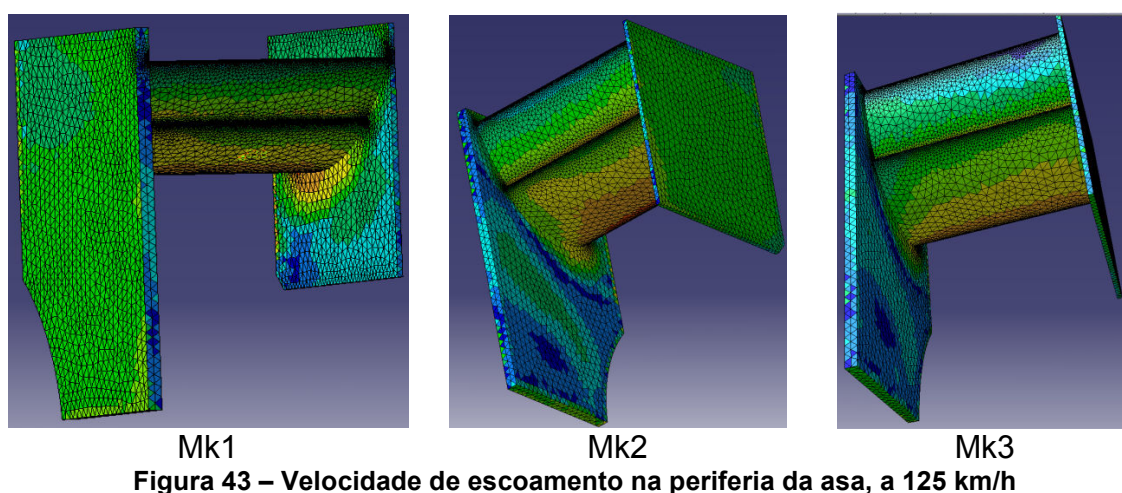
Conclui-se que estes aumentos de velocidade do escoamento verificados no bordo de ataque e no extradorso da asa são causados pela reduzida distância entre a asa e a roda, que forma um canal convergente que leva ao aumento da velocidade do escoamento e consequente diminuição da pressão. Sendo este aumento da velocidade explicável pela equação da conservação de massa.

Outra conclusão retirada das imagens obtidas é que a esteira provocada pela roda é bastante menor do que o esperado, visto que em nenhum dos casos a asa estava completamente dentro da região mais turbulenta da esteira da roda. Esta conclusão é baseada no facto da geração da esteira provoca uma

diminuição da velocidade e consequentemente do momento do escoamento, assim a zona atrás da roda que tem a menor velocidade trata-se da zona de esteira. Também presente nestas imagens, embora não perceptível, encontram-se os vectores de velocidade local que devido à sua orientação na área azul escura indicam-nos o comportamento aleatório nesta região do escoamento.



Verificou-se também que para as asas Mk2 e Mk3 a eficiência aerodinâmica destas era bastante inferior à da asa Mk1, para a mesma velocidade. Assim mais uma vez ao recorrermos às imagens obtidas das simulações apercebemo-nos de que quer a asa Mk2 quer a asa Mk3 estariam em perda.



Através da análise das imagens podemos verificar que no caso da asa Mk2 esta apresenta uma zona azul clara no bordo de fuga do “flap”, que nos indica que este estará a entrar em perda, devido à separação do escoamento. No caso da asa Mk3 para além da zona azul clara ainda poderemos ver uma zona azul escura que indica uma zona de velocidade nula no bordo fuga do “flap”. Para além desta evidência no “flap” podemos verificar que ao longo do extradorso da asa há uma variação das cores, que nos indicam velocidades diferentes.

Ao longo do extradorso da asa Mk1 é notável a predominância do amarelo com algumas zonas de laranja, o que nos indica velocidades de escoamento relativamente altas. No caso da asa Mk2 verifica-se também algum amarelo, contudo ao aproximar-se do bordo de fuga da asa verifica-se uma área de verde superior à da asa Mk1, o que evidência que a velocidade do escoamento

no bordo de fuga da asa Mk2 é inferior à asa Mk1. Por fim na asa Mk3 há uma predominância das tonalidades verdes em comparação com as restantes asa, o que indica velocidades de escoamento substancialmente inferiores do que nas restantes asas.

Embora estas imagens apenas nos mostrem o caso da simulação a 125 km/h, este comportamento do escoamento é notório em todas as velocidades analisadas.

Conclusões

Este trabalho ficou um pouco distante dos objectivos propostos, pois o objectivo inicial consistia na avaliação e optimização da colocação da asa na esteira das rodas, para as velocidades escolhidas. Contudo, durante o decorrer do trabalho verificou-se que seria complicado realizar todos os objectivos. Assim este trabalho poderá ser considerado como um estudo inicial que servirá para indicar o caminho a seguir em futuros trabalhos.

Embora este trabalho tenha sido bastante interessante de realizar tratou-se de um trabalho que foi bastante difícil e realizar. A selecção de um software recente provou ser uma decisão incorrecta, embora se tratasse de um software de um fabricante com bastante experiência no mundo da dinâmica de fluidos computacional. O software tinha alguns “bugs” que sem o apoio de um elemento da Ansys não teria sido possível corrigi-los. Outro problema relacionado com a juventude tratou-se da falta ou mau funcionamento de algumas ferramentas de pós-processamento. Os problemas verificados com a ferramenta de desenho das linhas de corrente dificultaram o trabalho pois sem elas tornou-se impossível o estudo do escoamento tridimensional, com vista à escolha de uma colocação da asa, que pudesse utilizar a esteira de modo a evitar a separação do escoamento da asa.

Para além dos problemas da juventude do software a falta de literatura, de tutoriais e de utilizadores experientes deste software dificultaram a aprendizagem e utilização do software. E mesmo com a conclusão deste trabalho ainda há muito para ser estudado e aprendido pelo autor, pois devido à falta de experiência poderá haver algumas situações que levam à falta de precisão nos resultados obtidos.

Não poderá ser considerado como um trabalho completo pois há inúmeras situações que poderão ser alteradas e corrigidas de modo a trazer mais alguma validade aos resultados. Uma das situações trata-se da evidente limitação no que toca aos meios computacionais, que levaram à simplificação do trabalho e que consequentemente poderão ter levado à utilização de um escoamento bastante diferente do verificado caso se estudasse um carro completo. Neste trabalho também foram desprezados alguns efeitos térmicos, quer a nível dos pneus cuja temperatura de funcionamento se situa na ordem dos 100°C, assim como escoamentos saídos da refrigeração dos travões e do sistema de escapes do carro.

Estava prevista uma terceira fase que visava a análise do escoamento tridimensional em torno da roda e a sua utilização na tentativa de encontrar um local óptimo para a colocação da asa, na tentativa de evitar a separação do escoamento a determinada velocidade, tal como os geradores de vórtice fazem nas asas das aeronaves.

Contudo devido a uma melhoria significativa do desempenho da asa quando colocada na área prevista pelo regulamento, tornou-se desnecessário a realização de novos ensaios.

Referências

McBeath, S., "Competition Car Aerodynamics", Haynes Publishing, Sparkford, 2006

Katz, J., "New Directions in Race Car Aerodynamics", Bentley Publishing, Massachussets, 1995

Santos, F., "A História da Fórmula 1: Grand Prix", Talento, Algés, 2003

Benzing, E., "Dall'aerodinamica alla potenza in Formula 1", Giorgio Nada Editore, 2004

Wright, P., "Ferrari Formula 1, Under the Skin of the Championship Winning F1-2000", SAE International, Warrendale, 2003

Fox, R. W., Mcdonald, A. T., "Introdução à Mecânica dos Fluídos", LTC Editora, Rio de Janeiro, 2001

Fontes das imagens

http://racingjackets.com.au/store/F1_logo.jpg - logo da Formula 1

<http://www.autoracing1.com/images/2000Misc/downforce1.jpg> - diagrama do “downforce” no carro

http://www.f1-country.com/f1-engineer/racing_line.gif - trajectória da curva

<http://www.cstudio.net/ms04noserep.jpg> - conjunto asa dianteira nariz

http://www.carbonconcepts.co.uk/product_pages/single%20seater%20front%20wing%20system.jpg – asa dianteira

<http://www.algiecompositesinc.com/image/8257525.jpg> - asa traseira

<http://www.ne.jp/asahi/net/n-baba/F1/F1DIC/DIFFUSER.JPG> - difusor

http://www.vararam.com/images/tech/lotus_airbox01.jpg - caixa de ar

<http://www.ultimatecarpage.com/images/large/1106-1.jpg> - Alfa Romeo 158

http://galeria.forocoches.com/data/500/8604COOPER_T45.jpg - cooper T45

http://www.jsolana.com.mx/fotos/pilotos/lotus_38.jpg - Lotus 38

<http://www.forix.com/8w/tasman69/gh-tas69-49t.jpg> - Lotus T49

<http://www.f1-technologies.fr/wp-content/uploads/ferrari-312-1968-f1.jpg> - Ferrari 312

http://www.historicgrandprix.com/images/DSC_5615.jpg - Tyrrell 005

<http://b.f1-facts.com/ul/a/3582-lotus79>

<http://planetef1.freesevers.com/aero/lotus79b.jpg> - lotus 79

http://www6.ocn.ne.jp/~fra.nobu/img/brabham_2.jpg - brabham BT46

<http://atlasf1.autosport.com/2000/feb16/gray7c-2.jpg>- tyrrell 019

<http://www.gurneyflap.com/Resources/Imagen%20025.jpg> – fundo do carro e placa de madeira

http://www.formula1.com/photos/ta_article/full/ta_article_348.jpg - “barge board”

<http://www.gurneyflap.com/Resources/DSCN4304.jpg> - “winglet”

<http://www.gurneyflap.com/Resources/FERRARI%20F2003GA-807.jpg> –
“endplate”

<http://www.jungleboffin.com/images/artoriginals/fotosouvenirs/5.jpg> - Carro de 2006 com alterações regulamentares

<http://www.paddocktalk.com/news/html/images/f1/fia/05/fia-cdg-graphic.jpg> - conceito CDG para 2008

http://www.f1technical.net/images/features/cgd_pressure.jpg - Distribuição de pressão total num carro convencional e num carro CDG

<http://www.f1technical.net/images/docs/cdgaerotest/slipstream.jpg> - Resultado do estudo de Ali e Mcbeath

Regulamento técnico da Formula 1 para 2008 - [http://argent.fia.com/web/fia-public.nsf/115F0A1E47E0A282C12573FB0042CB0D/\\$FILE/1-2008%20F1%20TECHNICAL%20REGULATIONS%2022-02-2008.pdf](http://argent.fia.com/web/fia-public.nsf/115F0A1E47E0A282C12573FB0042CB0D/$FILE/1-2008%20F1%20TECHNICAL%20REGULATIONS%2022-02-2008.pdf) - Plano de referência

<http://maps.google.com.br/> - <http://maps.google.com.br/>

Restantes imagens obtidas pelo autor através da utilização dos componentes desenhados e dos resultados obtidos, para obter as imagens.